



中国电力百科全书

（第三版）



·水力发电卷·

《中国电力百科全书》编辑委员会
《中国电力百科全书》编　辑　部
编

中国电力出版社





中国电力百科全书

（第三版）

水力发电卷

《中国电力百科全书》编辑委员会 编
《中国电力百科全书》编 辑 部

CHINA
ELECTRIC POWER
ENCYCLOPEDIA

中国电力出版社

图书在版编目（CIP）数据

中国电力百科全书. 水力发电卷 /《中国电力百科全书》编辑委员会，《中国电力百科全书》编辑部编. —3 版. —北京 ：中国电力出版社，2014.6
ISBN 978-7-5123-5054-0

Ⅰ.①中… Ⅱ.①中… ②中… Ⅲ.①电力工业-中国-百科全书 ②水力发电-概况-中国 Ⅳ.①TM-12

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2013）第 247612 号

地图审图号：GS（2014）671 号

中国电力出版社出版、发行（北京市东城区北京站西街 19 号 100005 http：//www.cepp.sgcc.com.cn）
北京盛通印刷股份有限公司印刷 各地新华书店经售
1995 年 5 月第一版 2014 年 6 月第三版 2014 年 6 月北京第四次印刷
889 毫米×1194 毫米 16 开本 39.25 印张 1716 千字
印数 12051—17050 册 定价 **350.00** 元



编辑委员会

编辑委员会顾问委员会

编辑委员会办公室

编　辑　部



编辑委员会

编辑委员会办公室

编　辑　部


中国电力百科全书
（第二版）

• 水力发电卷 •

（第三版）

编审委员会

主　　编　周建平

副 主 编　王柏乐　贾金生　孙志禹

编审领导小组　周建平　王柏乐　贾金生　孙志禹　华　峰

编　　委　（按姓氏笔画排列）

万凤霞　王仁坤　王柏乐　王　奎　王朝阳
王善春　叶建群　冯树荣　吕明治　华　峰
孙志禹　严秉忠　李修树　杨益才　吴关叶
冷　辉　张宗亮　张　敏　陈国庆　邵　荣
范福平　周建平　周晓光　赵　琨　郝巨涛
姚栓喜　贾金生　钱钢粮　徐泽平　郭　军
郭建欣　黄天润　黄晓辉

学术秘书　华　峰

各分支主编、副主编

概论分支

主　　编　钱钢粮

副 主 编　严秉忠

气象、水文、泥沙分支

主　　编　王仁坤

副 主 编　张　敏

力学基础分支

主　　编　徐泽平

副 主 编　郝巨涛

工程地质勘测分支

主　　编　范福平

副 主 编　杨益才

水能利用分支

主　　编　吕明治

副 主 编　王朝阳

环境保护分支

主　　编　张宗亮

副 主 编　邵　荣

移民安置分支

主　　编　冯树荣

副 主 编　王　奎

水工建筑物分支

主　　编　吴关叶

副 主 编　叶建群

施工分支

主　　编　姚栓喜

副 主 编　黄天润

水力机械和电气分支

主　　编　赵　琨

副 主 编　万凤霞　李修树

工程造价分支

主　　编　郭建欣

副 主 编　王善春

运行与维护分支

主　　编　孙志禹（兼）

副 主 编　陈国庆

水电站实例分支

主　　编　郭　军

副 主 编　周晓光

• 水力发电卷 •

（第一版）

编审委员会

主　　　编　杨德晔
副　主　编　董育坚　张德平　伍宏中
编审领导小组　杨德晔　董育坚　张德平　伍宏中　贺至刚
　　　　　　华　峰　陈叔康
编　　　委　（按姓氏笔画排列）
　　　　　　伍宏中　华　峰　杨德晔　邴凤山　谷云青
　　　　　　沈淦生　张德平　陈叔康　陈祖安　郑顺炜
　　　　　　贺至刚　唐友一　黄宣范　曹学敏　章景安
　　　　　　董育坚　蒋国澄
学术秘书　邴凤山

各分支主编、副主编、编审组成员

概论分支

主　　编　曹学敏
编审组成员　赵毓崑　欧阳华
　　　　　高又生

气象、水文、泥沙分支

主　　编　唐友一
编审组成员　余常昭　张　仁
　　　　　刘一辛

力学基础分支

主　　编　蒋国澄
编审组成员　陈愈炯　陆家佑
　　　　　范元勋　濮家骝

勘测设计和科研试验技术分支

主　　编　郑顺炜
副 主 编　陈祖安
编审组成员　蒋国澄　邹小安
　　　　　朱建业　崔诗礼

水能利用分支

主　　编　伍宏中（兼）
编审组成员　许自达　朱藻文
　　　　　欧阳华　刘兰桂
　　　　　赵毓崑

环境保护及水库淹没分支

主　　编　沈淦生
编审组成员　张根林　刘一辛

水工建筑物分支

主　　编　董育坚（兼）
编审组成员　林可冀　王树人
　　　　　李必如　沈德民
　　　　　丁志华

水电站工程施工分支

主　　编　章景安
编审组成员　王庭济　王守道
　　　　　龚贵焘

水电站机电部分分支

主　　编　张德平（兼）

编审组成员　王　冰　青长庚　裴秉镛　潘天缘　梁见诚

水电站运行管理分支

主　　编　黄宣范

编审组成员　杨承沪　刘丽栗

国内外水电站实例分支

主　　编　杨德晔（兼）

副 主 编　谷云青

编审组成员　熊思政　赵增凯　李维藩

• 水力发电卷 •

（第二版）

编审委员会

主　　　编　高安泽　程念高
副　主　编　王柏乐　高季章
编审领导小组　高安泽　程念高　王柏乐　高季章　张德平
　　　　　　华　峰
编　　　委　（按姓氏笔画排列）
　　　　　　王小润　王柏乐　华　峰　杨多根　杨金栋
　　　　　　张一军　张有天　张德平　岳立夫　周尚洁
　　　　　　赵深山　赵毓崑　袁定远　高安泽　高季章
　　　　　　郭义华　唐友一　蒋国澄　程念高

各分支主编、副主编

概论分支
主　　编　赵毓崑

气象、水文、泥沙分支
主　　编　唐友一

力学基础分支
主　　编　蒋国澄

勘测和试验技术分支
主　　编　郭义华

水能利用分支
主　　编　袁定远

环境保护分支
主　　编　赵深山

水库淹没分支
主　　编　张一军

水工建筑物分支
主　　编　王小润

施工分支
主　　编　杨多根

水力机械和电气分支
主　　编　岳立夫

工程造价分支
主　　编　周尚洁

运行管理分支
主　　编　杨金栋

水电站实例分支
主　　编　张有天

第三版前言

《中国电力百科全书》（简称《电百》）第三版在中国电机工程学会成立80周年之际与广大读者见面了。《电百》是全面介绍电力科学技术和管理知识的大型专业性百科全书。《电百》的首次编纂始于1986年，先后于1994年和2001年出版发行了第一版和第二版。《电百》问世以来，受到了广大电力工作者和电机工程界人士的欢迎并得到认可，成为查阅电力基本知识的权威工具书。

《电百》第一版是由原水利电力部、中国电机工程学会、中国水力发电工程学会等共同倡议，从1986年开始，历时8年编纂完成的。全书分为《综合卷》《电工技术基础卷》《电力系统卷》《火力发电卷》《水力发电卷》《核能及新能源发电卷》《输电与配电卷》《用电卷》共8卷，5000多个条目、1000余万字。全书总结了当时电力工业科学技术成就以及生产和建设的经验，适应了电力科技人员和职工学习新技术、新知识的迫切需要。《电百》第二版的修编工作是在原国家电力公司组织下，从1998年开始到2000年完成。全书仍为8卷，共5400余条目，约1000万字，反映了20世纪最后十多年电力工业的快速发展和电力科技的进步，适应了中国电力工业发展的需要。《电百》第二版于2002年荣获第十三届中国图书奖。

《电百》第二版发行至今的十多年间，中国电力工业持续快速发展，电力科技水平不断提高。中国电力装机容量和发电量分别从2000年的3.19亿kW、1.37万亿kW·h提高到2013年的12.47亿kW和5.3万亿kW·h，均居世界第一位。电网发展也实现了历史性跨越，规模居世界第一，已经形成以区域同步电网为基础的全国互联电网（未计台湾省）。这十多年，电力系统结构逐步优化，技术装备水平快速提升，节能减排成效显著。电力系统的安全性、可靠性、经济性取得全面提高，适应了经济和社会发展对用电量增长和安全可靠供电的需要，有力支撑了国民经济的持续快速发展。

进入21世纪，中国经济社会发展的重要特征是工业化、信息化、城镇化、市场化、国际化，能源结构清洁低碳化趋势显著。这些重大社会需求决定电能高效清洁的生产、输送、分配和使用技术，已成为电力技术发展的主导方向，并且日益显现出新技术与传统技术交叉与融合的趋势。因此，有必要对《电百》第二版进行修编，更新和充实《电百》的内容，以充分反映21世纪头十年电力工业发展的新成就和电力科技发展的新特征。

2009年5月，在中国电机工程学会第九届会员代表大会上提出了《电百》第三版修编工作建议，得到会员单位广泛支持。2011年1月25日，《电百》第三版编辑委员会第一次会议在北京召开，修编工作正式启动，确定修编原则是“增补为主，简当为要”。

增补为主，就是要增补体现电力工业和电力科技发展的新内容。如全球气候变化、全寿命周期管理、信息安全等问题；在水力发电技术方面，包括高坝筑坝新技术、大型水轮机组集成技术、梯级水库群优化调度技术等；在火力发电技术方面，包括超超临界燃煤发电、大型火电机组直接空冷、整体煤气化联合循环发电（IGCC）及多联产、污染物控制和减排等技术；在现代核电技术方面，包括对投运核电机组通用技术的系统性介

绍，第三代先进压水堆技术AP1000、EPR，以及模块式高温气冷堆技术和第四代核能系统概况等；在可再生能源发电技术方面，包括风能资源评估、新型风电机组总体设计和关键部件制造、风电并网等技术，太阳能热发电及分布式光伏发电技术，以及深层地热和海洋能、潮汐能发电等新技术；在电网技术方面，包括特高压交直流输电技术、750kV超高压输电技术、智能电网技术、大型互联电网的分析和控制技术、电压源型直流输电技术等；还有现代信息通信技术、电力电子技术的新发展和新材料在电力系统中的应用等等。

根据电力科技发展的新趋势，《电百》第三版共设9卷，在第二版8卷的基础上，将《输电与配电卷》更名为《输电与变电卷》、《用电卷》更名为《配电与用电卷》，将《核能及新能源发电卷》拆分为《核能发电卷》和《新能源发电卷》。第三版的条目总数约为6300条，字数约1300万字。条目释文中，中国电力工业的数据一般截至2012年12月，国外电力工业的数据一般截至2011年12月，能源资源等数据以最新公布的为准。

简当为要，是百科全书的特征之一。百科全书是概要记述人类知识的大型工具书。《电百》第三版的释文编纂按照百科体例的编纂要求和“全、精、新、信、达、雅”的撰写质量要求，依据科学性、客观性、概述性、整体性、稳定性、可读性、规范性的百科特点进行修编。全书统一编纂指导思想、框架设计和体例要求，解决内容重复、交叉、矛盾和遗漏等问题。对修编条题，注重其概要性、知识性和逻辑性；对新增条题，博览精收、慎重选材，做到既简且当。同时，各卷都编写了概述性文章（专文）和大事年表。概述性文章是对本卷内容概括性介绍，体现本专业的特点、发展、现状和水平；大事年表是以编年体形式记录具有全局性、标志性、方向性的事情。读者通过概述性文章和大事年表可以对电力技术的发展有全面系统的了解，更加体现了简当为要的要求。

《电百》第三版修编实行主编责任制，编辑委员会组织了既有理论底蕴又有实践经验的1500多位专家、学者参与条目的撰写和审稿，其中卷正副主编和分支正副主编220余位。

《电百》第三版贯彻以科学发展观为指导，谋篇、谋卷、谋书，努力用全面协调可持续发展的观点，分析判断近十年来电力科技领域出现的新事物和新观点，集中反映21世纪初中国电力科技事业蓬勃发展的概貌，展示出其对中国乃至世界电力工业技术发展基本走向的影响。

在《电百》第三版即将付印的时候，我们十分感念那些为“电力百科”开启山林的拓荒者，他们为我们做出了榜样。《电百》第三版继承了第一、二版在知识分类、编辑体例、图表配置、全书条题检索等方面的工作经验和成果，并将前一、二版的双色印刷调整为全彩印刷，将原正16开本调整为大16开本，从而使第三版从内容到版式都有了更大的改进。令我们感到鼓舞的是，《电百》第三版获得了2014年度国家出版基金的资助，入选《2013—2025年国家辞书编纂出版规划》。

我们还要再一次向所有关心、支持和参与本书编纂出版的领导、专家、学者、编辑出版人员表示衷心的感谢！1500多位专家、学者的志愿工作、三年多的智慧和心血，凝结成为今天的鸿篇巨制。电力科学技术在飞速发展，希望《电百》第三版对电力科技工作者和管理人员能够有所裨益，更好地发挥其“没有围墙的大学”的功能。

《中国电力百科全书》编辑委员会
《中国电力百科全书》编　辑　部
2014年5月

第一版前言

经过8年的反复锤炼，《中国电力百科全书》终于脱稿付印，陆续出版了！这是1700多位专家，以高度的政治责任感和历史责任感辛勤耕耘、反复切磋的成果。参加这部百科全书编纂工作的同志大部分是电业部门的专家和著名大学的教授，也有很多电机制造部门的专家，用电电器研究方面的专家，核工业专家，能源专家，环境保护专家等等；他们是各个专业方面的权威人士，大都年事已高，仍不遗余力地以自己毕生的经验，参照大量的国际资料，字斟句酌地推敲每一个条目的释文；他们以满腔热情，努力争取时间，完成了5000多个条目、1000多万字的撰写、审阅、修改工作；在编写过程中有的老专家废寝忘食、带病工作，有的已经谢世。我们以十分崇敬和感激的心情向为本书工作过的专家们致以崇高的敬礼！

《中国电力百科全书》是于1986年8月由原水利电力部科技司、中国电机工程学会、中国水力发电工程学会、原水利电力出版社共同倡议，经原水利电力部部长批准，着手组织编纂的。1987年8月，在北京召开了编辑委员会成立大会，初步确定了分卷方案和条题框架，聘请各卷主编和各分支主编。之后，几经修改，拟定了各卷的条题总表，聘请了撰写和审阅的专家，于1989年着手撰写，先后经过分支的一审、修改，分卷的二审、修改，编委会常务领导小组组织的终审，再由分卷修改正式定稿。

编纂《中国电力百科全书》的目的，在倡议报告中已经指明，是“为了总结我国电力工业生产、建设的经验，介绍当代电力工业最新科学技术成就，迎接电力工业更大规模的发展，满足电力系统广大职工的需要。”当前，我们正在建设规模宏伟的现代化的电力工业，我们正在深入改革开放，经历从高度集中的计划经济到社会主义市场经济的变革，成百万的电业职工迫切需要学习新的技术和新的管理知识。同时，随着我国工农业现代化程度的提高，人民生活电气化程度的普及和提高，社会上对电力知识的需要也日益广泛。为此，本书的编纂，从格式到内容，均以满足电力科学技术人员、各级领导和管理人员、广大电业职工和大专院校电力类专业师生的需要为主，同时照顾到社会上广大读者的需要，力求深入浅出，使具有高中以上文化程度的人均可阅读。

《中国电力百科全书》是中国第一部全面介绍电力科学技术和管理知识的大型专业性百科全书。在编纂过程中，我们学习和借鉴了《中国大百科全书》的编纂经验，同时，也汲取了此前编纂的《中国水利百科全书》的经验。百科全书要求表达人类成熟的知识，要求所表达的知识具有科学性、客观性和稳定性，亦即具有一定的权威性。为此，本书在条题名称的选定和条目释文的概念叙述方面，均力求符合当代国际电业界一般共有的认识，对于某些国内惯用的概念与国外流行的概念不一致的，均分别加以说明。考虑到篇幅浩大，读者所需要的专业内容不一，特将全书按专业分为既有联系又相对独立的8卷，即：综合、电工技术基础、电力系统、火力发电、水力发电、核能及新能源发电、输电与配电、用电。读者可购置全套8卷，也可购置其中任何一卷。每卷条目排印均按

条目首字的汉语拼音顺序排列。为了便于读者按专业查找相关条目，在书首设有按专业知识分类的条目分类目录，在书尾设有3种检索系统，即条目汉字笔画索引、条目外文索引、内容索引。综合卷后还附有外国（国际）电力（能源）组织机构和学术团体译名对照表，以及中国电力工业大事年表。

为了记录近百年来，特别是中华人民共和国成立以来，为中国电业发展做出过重要贡献的人物，为中国电业发展培养了大量科技人才的优秀教师和学者，以及为中国电业的发展提供电力设备的电机、电器、动力设备制造部门的著名专家，共收录了3000多位人物的业绩，编纂了《中国电力人物志》，作为《中国电力百科全书》的附卷单独出版。

以上8卷和附卷中，条目释文中所载的史实和数据大都截止到1990年12月；对1990年12月之后国际时局的变化所引起国家的改变，均未作相应的修改。

本书的编纂和出版，是广大专家集体智慧的结晶和集体工作的成果，一个条目的释文往往经过多位专家多次修改才得以定稿，前后变动很大，甚至重新改写。但是，应该说明，没有第一稿的写出，也改不出最后一稿。所以，一个条目的写定，既是最后执笔者的成果，也是第一稿执笔者的成果。在反复修改过程中，专家们都不固执己见地热烈参与磋商讨论，务求循名责实，考虑全面，得出一个正确的概念，在这方面充分体现了他们对事业的政治责任感和对后代的历史责任感。电力方面的百科全书，在中国这是第一部，在国外，我们也未见先例。因此，尽管我们尽其可能地作了努力，但疏漏与错误之处还不可避免，我们诚恳地希望广大读者和专家给予批评和指正，以期本书再版时订正提高。

再一次向所有关心、支持和参与本书编纂出版的领导、专家、学者、编辑出版人员表示衷心的感谢！

《中国电力百科全书》编辑委员会

《中国电力百科全书》编　辑　部

1994年6月

第二版前言

《中国电力百科全书》（简称《电百》）的编纂工作始于1986年，在国家电力领导部门的重视和社会各界的关注下，全国1700多位专家、学者历时8年终成腋裘，付梓刊行。

《电百》（第一版）条目释文引用的数据和资料基本上截至1990年底。十年来，世界电力工业的状况发生了重大变化。作为目前最清洁和使用最方便的二次能源，电力在推动社会经济进步、提高人民生活质量方面发挥着越来越重要的作用。十年来，电力工业围绕进一步提高能源利用效率和供电可靠性，加强对生态环境的保护从而实现可持续发展，在许多技术领域取得了重大进步。例如，在洁净煤发电技术研究开发与应用方面，已相继建成示范电厂并开始商业运营；大容量、超临界和超超临界压力机组迅速发展，正在成为发达国家火力发电厂的主力机组；广泛采用新技术加强对有害排放物、电磁波、放射性污染的治理；高电压、大容量、远距离交直流输电技术和电力系统理论与技术的继续进展与提高；高效率燃气轮机技术的发展与应用；分散型电、热、冷三联供装置和大幅度提高电力用户终端效率的各种新技术、新装置的相继出现，以及计算机技术和信息网络技术在电力工业中的应用等等，正在明显地改变电力工业的技术状况。与此同时，世界范围内经济的市场化、信息化、全球化正在给电力行业传统的垄断地位和经营方式带来巨大的冲击。随着竞争机制的引入，许多国家的电力管理体制已经或正在经历空前的变革，向着放松管制的商业化、民营化方向发展。

在世界各国电力科学技术发展和管理体制变革的同时，中国电力工业在90年代取得了突飞猛进的发展。从1996年下半年起，全国电力供需基本平衡，结束了持续20多年全国性缺电的局面，基本上适应了国民经济发展和人民生活水平提高对电力的需求。1995年全国电力装机总容量达到2亿kW，年发电量超过10000亿kW·h；1999年全国电力装机总容量达到2.98亿kW，年发电量达到12331亿kW·h；2000年4月，我国的装机容量超过了3亿kW。无论在电力装机容量上还是在发电量上，中国电力都已居世界第二位。到1999年底，已建成和正在建设的100万kW及以上的火电厂、核电厂和水电站已超过100座，其中邹县发电厂240万kW，二滩水电站330万kW。世界最大的水电站、装机容量达1820万kW的三峡水电站已于1994年12月开工建设、1997年11月实现了大江的截流，即将于2003年开始并网发电。继秦山核电厂和广东大亚湾核电厂投产后，广东岭澳核电厂（180万kW）和秦山第二核电厂（120万kW）、秦山第三核电厂（140万kW）及田湾核电厂（200万kW）均已开工建设。风力、地热、太阳能、潮汐等可再生能源发电也得到进一步的发展。全国风力发电装机总容量已达26.7万kW，在中国的西部地区建成了一批小容量试验性的太阳能光伏电站。到90年代末，中国已建成的500kV输电线路约2.29万km，变电容量8012万kV·A；330kV输电线路7949km，变电容量1248万kV·A；220kV输电线路12.18万km，变电容量2.80亿kV·A；同时还进行了大规模的城乡电网建设与改造。目前在全国已形成了7个跨省的大型区域电网和5个独立省网，其中最大的区域电网

华东电网装机容量已达5198.64万kW，最大的省网广东电网装机容量也达到3033.37万kW，全国电网的覆盖率已达到96.4%。中国的电网已进入了跨大区、跨独立省（区）电网互联的阶段，并正在走向全国联网的超高压、高度自动化的现代化电力系统的新阶段。

在过去的10多年里，中国电力工业的管理体制经历了巨大的变化。1988年4月撤销了水利电力部，成立了能源部；1993年3月又撤销能源部，组建电力工业部；1997年成立国家电力公司，1998年电力工业部撤销。按照国务院的改革方案，国家电力公司经营管理授权范围内的国有电力企业，国家经贸委行使管理中国电力工业的政府职能，中国电力企业联合会行使电力行业管理与服务职能。这是中国电力管理体制的重大改革，是中国电力工业由计划经济向市场经济转变的重要标志。

根据电力科学技术在90年代所取得的重大进展、管理体制的变革情况，以及中国国民经济在2000～2010年期间再翻一番和2010年中国电力装机总容量将发展到5亿kW的总目标，为了使《电百》的内容能够反映当前国际和国内电力工业的最新技术和管理水平，适应21世纪前十年我国电力工业发展的需要，进一步满足各级领导干部、电力系统内外的科学技术和管理人员以及广大读者查询、浏览、了解现代电力科学技术和管理知识的需求，中国国家电力公司决定，对《电百》（第一版）进行修订，并于2000年9月起陆续出版《电百》（第二版）。

编纂出版《电百》（第二版）的总原则是：在第一版的基础上对各卷内容删繁就简，增补更新，力求达到精益求精；努力增加最新电力科学技术成就和管理经验的内容，注意解决第一版中存在的问题和不足；使《电百》（第二版）具有时代特征，符合规范要求，开卷有益，查阅方便。

《电百》（第二版）的编纂工作于1998年8月起动。为了使《电百》能以条目的形式汇集和总结电力科学技术和管理知识，真正发挥大型专业性百科全书的作用，我们组织了电力工业各门类的约1100位专家、学者参加了修订、编纂和审稿工作。这些专家怀着满腔热忱、高度责任感和使命感，废寝忘食、夜以继日地工作，以广博的知识和丰富的经验，使《电百》条目的释文尽可能完美地体现其思想和智慧。

《电百》（第二版）仍沿袭第一版的做法，采用按专业分类分卷、各卷条目按汉语拼音字顺编排的出书方式。全书仍分为综合、电工技术基础、电力系统、火力发电、水力发电、核能及新能源发电、输电与配电、用电等8卷，释文共有5400余条目，总字数约1000万字，其中新增条目和经过修改的条目约占全书的70%以上。

尽管我们期待《电百》不仅具有电力科学技术知识的魅力，同时具有文字的魅力和鲜明的时代色彩，尽管我们希望广大读者在阅读与浏览，查询与解惑中能达到充实自己的目的，但书中难免有疏漏和错误之处，恳请读者批评指正，以期再版时订正。

谨向所有关心、支持和参与本书编纂出版的领导、专家、学者、编辑出版人员表示衷心的感谢，是他们卓有成效的努力使本书为广大读者营造了一个开卷有益的氛围，使本书以气势恢宏的构架、翔实丰富的内容、精辟练达的文字、生动具体的彩色插图导引读者漫游电力科技知识的海洋。

《中国电力百科全书》编辑委员会
《中国电力百科全书》编　辑　部
2000年9月

凡　　例

一、编　　排

1. 全书按专业知识领域分为综合、电工技术基础、电力系统、火力发电、水力发电、核能发电、新能源发电、输电与变电、配电与用电等9卷出版。

2. 各卷按前言（包括全书第三版前言、第一版前言、第二版前言），凡例，概述性文章，本卷第一、二版前言，条目分类目录、正文、大事年表、条目标题汉字笔画索引、条目标题外文索引、内容索引、插图索引、附录等编排。

3. 全书的主体是条目。条目既是基本知识单元，也是基本寻检单元。条目由条目标题（条题）、释文和相应的图片、表格、参考书目等组成。

4. 全书条目按条目标题的汉语拼音字母顺序并辅以汉字笔画、起笔笔形顺序排列。同音时按汉字笔画由少到多的顺序排列，笔画数相同的按起笔笔形一（横）、丨（竖）、丿（撇）、丶（点）、乛（折，包括ㄱ乚く等）的顺序排列。第一字相同时，按第二字，余类推。条目标题以罗马数字、阿拉伯数字、拉丁字母、斯拉夫字母和希腊字母开头的，按习惯发音依次排在汉语拼音相应字母部的前部。

5. 各卷在条目分类目录之前均有一篇介绍本卷内容的概述性文章。概述性文章从宏观上展现本卷的形象，且把本卷组成一个有机的整体，对本卷的条目起到统领作用，成为本卷的纲要。概述性文章介绍了本卷的专业特点、内容范围、历史发展和现状等内容，以帮助读者对本卷有概略而全面的了解。

6. 各卷均列条目分类目录，供读者按学科知识体系查检所需要的条目。为了保证各分支体系的完整性，有少数条目在不同分支目录里重复出现。条目分类目录还反映出条目间的系统性、层次性，例如：

水力机械
　水轮机
　　[水轮机型式]
　　　混流式水轮机
　　　轴流式水轮机
　　　斜流式水轮机
　　　贯流式水轮机
　　　冲击式水轮机

7. 为保持知识体系的完整性和便于读者查阅，内容完全相同的条目，可以重复出现在不同卷。对卷间交叉的知识主题，条目列在以学科知识内容为主的卷中，在其他卷中则通过条目标题加以区别。

二、条　目　标　题

8. 条目标题由词或词组组成，例如“坝”“水头”“水轮机”；“水轮发电机组自动控制”“水电站经济评价”。

9. 条目标题一般由汉语标题和与汉语标题相对应的汉语拼音、外文三部分组成。例如：

shuili fadian

水力发电 (hydropower)

个别无通用译名的纯属中国内容的条目标题则不附外文。条目标题有多个对应外文的，中间用分号（;）隔开。

三、释　文

10. 条目释文使用规范化的现代汉语书面语言。条目释文开始一般不重复条目标题。

11. 条目释文较长时，设置层次标题。

12. 条目内容涉及其他条目并需由其他条目的释文补充的，采用“参见”的方式。所参见的条目标题在释文中出现的，用楷体字排印，例如“*抽水蓄能电站*发电工况也是把水能转换成电能”。所参见的条目标题未在释文中出现的，则另用括号加“见”标出，例如“坝基一般为岩石基础，采用预留保护层的开挖方式（见*土石方开挖*）”。全条与其他条目密切相关时，参见放在释文末尾，另行起写“见×××。”，不加括号。

13. 条目释文中出现的外国人名，第一次出现时在姓（汉译）前均加有外文名的缩写（即名的第一个字母），并在括号内附对应外文，例如 I. 牛顿（Isaac Newton 或 I. Newton）。外国地名一般不附原文，个别生僻无标准译名的则在第一次出现时用括号附原文。

四、插　图

14. 条目释文中配有必要插图，均随文编排。

15. 插图一般与释文相呼应。只有一个插图时，不编号。

16. 插图附有图题、图注等说明性文字。

五、参考书目

17. 部分条目释文后附有参考书目，供读者选读。

六、索　引

18. 各卷正文后均附有全部条目标题的汉字笔画索引、条目标题的外文索引，以及按音序编排的内容索引和插图索引。

七、其　他

19. 全书所用科技名词术语以全国科学技术名词审定委员会审定的为准，未经审定和尚未统一的，从习惯。地名以中国地名委员会审定的为准。

20. 全书所用汉字除必须用繁体字的以外，一律使用国务院 2013 年 6 月公布的由教育部、国家语言文字工作委员会制定的《通用规范汉字表》所列的汉字。

21. 全书数字的使用，均执行 GB/ T 15835—2011《出版物上数字用法》。

22. 全书所用计量单位，除引用经验公式或涉及实验数据的精度难以改变，以及历史上所用的某些单位外，一律采用中华人民共和国法定计量单位。在表达量值时采用单位的国际符号。

23. 全书所列中国统计数据，一般未包含台湾省和香港、澳门特别行政区数据。

水　力　发　电

周建平

水电是清洁的、高效的可再生能源。因技术成熟、调度灵活，**水电站**已经成为电力系统发电、调峰、调频和事故备用不可或缺的重要工具，对保障电网经济安全运行发挥着重要作用。**大中型水电站**还兼有防洪、供水、灌溉、航运、旅游、保护生态环境以及促进地方经济社会发展等综合利用功能。加快水电开发对于减少不可再生的化石能源消耗，建设环境友好、可持续发展的和谐社会具有十分重要的意义。

水电一直是各国经济发展初期的首选，优先发展水电是各国的共同选择。美国在西部大开发、经济大萧条时期，均以水电开发作为拉动国家经济建设的重要举措。二战期间水电在为生产战略物资提供动力方面起到了重要和不可替代的作用。到2012年底，全球**水力发电**提供了约16%的电量。有65个国家水力发电量超过其总发电量的50%，有32个国家依靠水电为其提供80%以上的电力，有13个国家依靠水电为其提供几乎全部的电力。发达国家在20世纪六七十年代就经历了水电建设的高峰，到20世纪末水电开发任务基本完成，水电开发程度超过70%。中国水电的大规模开发始于20世纪80年代中期，较欧美发达国家晚了近40年，因为水电开发程度低、开发潜力大，当前和今后一段时期，仍将是中国水电**装机容量**稳定增长的发展阶段。

水电发展历程

人类开发利用水能的历史可上溯几千年。早在2000多年前，我们的先辈就研制出水车、水磨等器具，利用水能做功发展生产和满足生活需要，这是古人开发利用**水能资源**的雏形。水力发电则诞生于工业革命时期——1878年法国建成世界上第一座水电站。这在水能资源开发利用进程中具有划时代的意义。从水力到水电的飞跃也是人类从农业社会进入工业社会的重要标志。

继世界上第一座水电站建成投产后，1882年美国建成了瓦肯街（Vulcan Street）水电站，1897年瑞士与德国界河上的莱茵费尔德（Rheinfelden）水电站竣工投产。1912年，中国大陆第一座水电站——石龙坝水电站建成投产，开启了中国水电事业艰难而辉煌的征程。中国水电的起步虽然仅比世界最早的法国晚20多年，但当时中国积贫积弱、战事连年，水电事业发展艰难坎坷，到20世纪中叶，中国水电技术已经落后世界50年。至1949年底，中国水电**装机容量**仅360MW，**年发电量**12亿kW·h，而这主要还是日本侵占中国东北时建设的。

1949年中华人民共和国成立后，水电建设事业出现了第一次高潮。20世纪50年代，中国“自主设计、自制设备、自己建设”的第一座大型水电站——**新安江水电站**开工建设，1960年第一台机组投产。到20世纪80年代，中国自力更生地建设了一批中小型水

电站以及三门峡、刘家峡、丹江口、乌江渡、葛洲坝等大型水电站，为国家建设提供了优质的能源电力。这一时期，中国政府还查明和规划了主要河流河段的水能资源，锻炼和壮大了水电队伍，积累和发展了技术和装备，为中国水电加快发展创造了基础条件。

20世纪80年代以后，中国实施改革开放政策，发展市场经济，为水电开发注入创新前进的动力。利用外资和集资办电则为水电开发引入了全新的理念与开发模式。“鲁布革冲击波”打破了计划经济时期水电建设管理体制，随后广州抽水蓄能、岩滩、漫湾、水口、隔河岩5个百万千瓦级水电站相继实行了业主负责制、招标承包制、建设监理制。这些项目在进度控制、质量控制和投资控制等方面取得了显著成绩和进步，被业内誉为“五朵金花”。按照建立市场经济体制和公司法的要求，清江、五凌、乌江、黄河上游等水电开发企业都进行了建立流域梯级开发公司的改制，构建起了法人责任体系。中国依托天生桥一级、二滩、小浪底、三峡工程的建设，引进世界先进技术、装备和管理经验，在消化吸收和再创新的基础上，**水电工程技术**又迈上了一个新的台阶。

进入21世纪，中国西部大开发战略再次给水电发展创造了良好机遇，三峡工程顺利建设，百年三峡梦想从规划蓝图变成了美好现实。在西部大开发和“西电东送”战略指引下，水电规划设计和工程科技取得新成果，龙滩、小湾、景洪、拉西瓦、瀑布沟等一批大型水电站相继开工建设，中国水电工程规划、设计、施工、设备制造、安装与运行管理等相关企业或专业队伍也实现了全面跨越，达到世界先进水平，并在国际市场上崭露头角。

以糯扎渡、锦屏一级、锦屏二级、向家坝、溪洛渡等大型水电站建成投产为标志，中国水电技术引领世界水电技术的未来，成为发展中国家开发学习和借鉴的样板。中国是世界上水电在建规模最大、发展速度最快的国家。越来越多的中国企业“走出去”，帮助发展中国家开发利用水能资源。苏丹麦洛维水电站、马来西亚**巴贡水电站**、柬埔寨甘再水电站等，由中国企业建造并提供设备。水电建设已成为中国企业在国际市场上具有较强竞争力的行业之一。

中国水能资源特点及开发现状

中国水能资源分布的特点，一是水能资源地区分布不均，主要集中在西部地区，因此需要借西部大开发实施“西电东送”；二是水能资源时间分布不均，河川**径流量**主要集中在汛期，因此需要建设大型**水库**进行调节；三是水能资源集中在大江大河、大型水电站，数百座大型水电站的装机容量占技术可开发装机容量的80%以上，因此便于集中开发；四是**小水电**资源丰富，分布十分广泛，适合地方、农村、农民开发。

为准确掌握中国水能资源条件和资源储量，2000～2003年，中国国家发展和改革委员会组织全国1000多名工程技术人员，历时3年，开展了全国水能资源复查。复查范围涵盖中国大陆境内河流装机容量10MW及以上的3886条河流。根据复查成果，并结合2009年水利部发布的小水电调查数据，中国100kW及以上的水电站技术可开发装机容量约6.0亿kW，年发电量约27200亿kW·h，水能资源丰富，技术可开发量占全球的17%，居世界第一。世界上水能资源前10位的国家如图1所示。

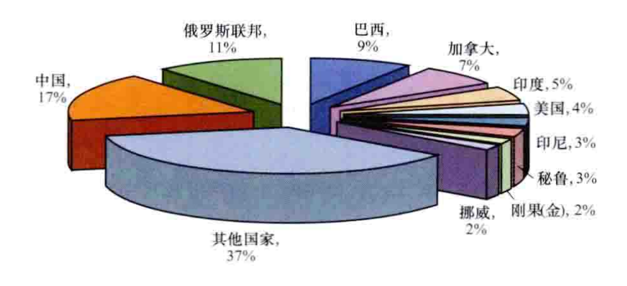


图1　世界水能资源的分布情况

中国水能资源丰富，仅次于煤炭资源，居于十分重要的地位。2010年底，中国化石能源剩余探明可采储量中，煤炭为1145.0亿t，储采比为35.0；石油为20亿t，储采比为9.9；天然气为28000亿m^3，储采比为29.0。水力资源为可再生能源，按照使用100年计算，中国常规能源剩余可采储量：原煤占61.6%，水力资源占35.4%，原油占1.4%，天然气占1.6%。

2003～2012年中国新增水电装机容量136.7GW，是前10年的3倍多。到2012年底，总的水电装机容量达到249GW，占全国发电装机容量的21.7%；年发电量8641亿kW·h，占全国总发电量的17.3%，见图2。水电装机容量构成中，常规水电站228.60GW，抽水蓄能电站20.40GW。2012年，中国常规水电装机容量和发电量分别占技术可开发装机容量和年发电量的38%和31.6%。与发达国家比较，中国水能资源开发程度不足发达国家平均水平的50%，开发潜力大。

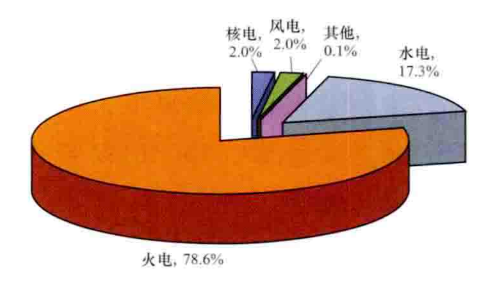


图2　2012年底中国发电量的构成

中国水电工程技术

中国水电开发始终坚持以科学技术为引领，以重大工程为依托，以科技成果工程化不断推进水电工程建设，逐步形成了完备的工程科研、设计、施工、设备制造安装和运营管理体系。

中国高坝筑坝技术水平世界领先。截至2102年底，中国已建和在建30m以上大坝5565座，其中300m级高坝2座，200～300m高大坝14座，100～200m高大坝近200座。中国大坝数量世界第一，高100m及以上大坝的数量几乎占世界的1/2。锦屏一级水电站拱坝，坝高305m，为世界第一高坝。水布垭水电站面板堆石坝，坝高233m，为世界第一高面板堆石坝。龙滩水电站碾压混凝土重力坝，设计坝高216.5m，坝体混凝土量860万m^3，已建成一期工程，坝高192m。长江三峡水利枢纽，坝高181m，坝顶长度2309.47m，坝体混凝土工程量1600万m^3，工程规模世界第一。糯扎渡水电站心墙堆石坝，坝高261.5m，为中国第一高土石坝。在建的双江口心墙堆石坝，坝高达314m。处于汶川地震极重灾区的紫坪铺面板堆石坝、沙牌碾压混凝土拱坝，坝高分别为156m和132m，均经受了超过设计地震烈度的考验，没有造成严重损坏，也没有造成次生灾害。高坝筑坝的一些重大课题和关键技术，如筑坝材料研究、大坝体型和结构设计优化、深覆盖层复杂坝基处理、高水头泄洪消能、高含沙河流泥沙防治、高陡边坡及滑坡体治理、高坝工程抗震技术、机械化自动化信息化施工技术、大体积混凝土智能化温度控制和防裂技术等，取得全面突破。其中，高坝抗震技术、坝基处理技术、泄洪消能技术处于世界领先水平。

中国水力发电设备国产化水平显著提高，能够自行研发、设计、制造、安装各种类型的水轮发电机组，满足大规模水电开发的需要。中华人民共和国成立到改革开放之初，是中国水电设备工业由小到大蓬勃发展的时期。在此期间，中国自主研制生产混流式、转桨式、冲击式水轮发电机组，满足了国内水电工程建设的需要，但与发达国家机组设

计制造技术比较，仍存在很大差距。改革开放以后，中国鲁布革、水口、漫湾、东风、隔河岩、五强溪、岩滩等一批大型水电站开始建设，通过利用外资并采取国际招标，引进国外先进技术，使得中国水电工程技术，包括机电设备设计制造技术，逐步赶上了世界水电工程技术发展的步伐。长江三峡水利枢纽安装有单机容量为840MV·A的混流式机组，推力轴承负荷达5500t，转轮直径10.6m。**水口水电站**安装有世界上最大、水头最高的轴流式机组，单机容量200MW，最大水头57.8m，转轮直径8.0m，推力轴承负荷4100t。长洲水电站安装有15台单机容量42MW、运行水头2.5～16m、转轮直径7.5m的国产灯泡贯流式机组，其工程规模在世界同类电站中位居第一。在世界范围内都没有现成经验的情况下，中国企业和科研机构自主研发，已经取得1000MW机组设计制造的核心技术。1000MW级机组将首先运用于建设中的乌东德和白鹤滩水电站，2020年前投入运用。

水电工程建设带动了大容量、远距离、交直流高压输电网络的形成。高等级电压和大电网几乎都是伴随大型**水电基地**的开发而诞生的。巴西**伊泰普水电站**的建设带动了±600kV直流输电线路及±800kV输变电设备的研制。俄罗斯西伯利亚大水电开发中，建设了1000kV特高压交流输电线路。20世纪50年代，中国第一条110kV输电线路为官厅水电站向北京输电而建。50年代中期，中国自行设计和建设的第一条220kV输电线路为**丰满水电站**向沈阳输电而建。70年代，中国第一条330kV输电线路由**刘家峡水电站**送电至关中地区，形成了西北地区330kV网架。中国第一条±500kV直流输电线路为**葛洲坝水利枢纽**向上海输电而建。依托**公伯峡水电站**送出工程，中国建成了第一条750kV（官亭—兰州东）输电线路，形成了西北五省区以750kV为主网架的电网。三峡送出工程规模空前，电力输送至上海、常州和广州，建成±500kV直流输出线路3000km、500kV交流输电线路900km，±500kV直流换流站6个，直流变电项目44个，500kV交流线路61条，创造了多项世界之最，有力促进了全国联网和能源资源的优化配置。随着西南金沙江、澜沧江、雅砻江等水电基地的开发，“西电东送”工程推动了电网建设，如向家坝—上海±800kV、锦屏—苏南±800kV、溪洛渡—浙江±800kV等特高压直流输电线路的建设，形成了“西电东送、南北互供、全国联网”的大格局。为满足西部水电远距离输送的需要，中国启动了1000kV特高压交流输电示范工程的建设，进一步确立了在特高压输电领域的技术领先优势，提升了电工装备业的自主创新能力和核心竞争能力，对于建设坚强的特高压骨干网架，促进大水电、大煤电、大核电和大型可再生能源发电基地的集约化开发，实现能源资源更大范围内的优化配置，构建现代能源综合运输体系，具有十分重要的意义。

水电环境保护

世界各国在水电开发中均逐步认识到和重视生态环境保护工作，进一步加强研究，采取措施，保护河流生物多样性；优化水库运行调度；加强**生态调度**，补偿河流生态，缓解环境影响；加强科普宣传，提高公众流域开发和保护意识。

水电开发对环境的影响是多方面的，包括**水生生态影响**、**陆生生态影响**、水文情势影响，以及施工期和运行期影响、局地和广域影响、近期和长远影响、有利和不利影响

等。当前，中国政府提出要在做好生态保护和移民安置的前提下积极发展水电，强调做好生态环境保护工作对于水电可持续发展的重要性，是中国今后一段时期做好水电生态环境保护工作的重要指导思想。

中国水能资源丰富的地区，往往也是自然环境良好、生态功能重要、生物物种丰富和地质条件脆弱的地区，生态系统敏感度较高、稳定性相对较差。受历史原因和认知水平的限制，水电开发在一定阶段存在“保护让位于开发，保护跟不上开发”的现象，对一些河流的水生生态、景观环境等造成了难以恢复的影响，部分河段水电开发与生态保护的矛盾突出。因此，必须正确处理水电开发与生态保护的关系，将保护生态环境的要求贯穿到水电规划设计、开发建设和运行维护的全过程。

世界各国在水电建设生态环境管理方面有很多成功的经验，如瑞典和欧盟建立了“绿色水电”认证制度，美国开展了“低影响水坝”评估，不丹则为了保护森林植被而基本将**水电站厂房**修建在地下。总体来看，这些经验的核心就是坚持生态环境保护原则，其关键是研究制定合理的水电开发方案，保留必要的生态空间，避让重要的生态敏感区，提出并切实落实环境保护对策措施。

河流生态环境演变的科学研究尚不够充分，还缺乏权威的评价标准，因此**水电环境影响评价**的结论因人因时而异。公众对开发水电所造成的环境影响存在不同的认识，观点甚至完全对立。站在不同的角度，得到不同的结论是必然的，关键是如何系统思考、综合权衡。欧盟、美国、日本等发达国家水电开发早，开发程度高，生态环境好，说明开发水电不会必然导致灾难性的后果。恰恰是水电合理、适度的开发保护了河流生态环境，这是值得研究和借鉴的经验。各个国家自然环境不同，经济发展水平存在差距，水电开发的环境影响也就不能一概而论。

水电开发对环境的不利影响主要是筑坝拦断河流、改变水文情势造成对河流鱼类的影响。为保护鱼类资源和水生生物的多样性，研究采取相应的鱼类保护措施是必要的。这些措施包括统筹规划干支流、上下游的水电开发与生态保护区的关系，做好干流开发和支流保护的有机衔接，设置鱼类保护区或过鱼通道；统筹规划河流生产、生活、生态以及景观用水的需要，研究制定水库优化运行方案，充分保障生态用水，满足生物生存空间和通道的要求；统筹考虑流域梯级水电开发的累积性、累进性环境影响。研究采取水电站**分层取水**、珍稀鱼类人工繁殖放流、河流生态环境修复等技术措施，维护河流生态系统的功能。

加强水电环境保护的科学研究和监管十分必要。一是要加强河流生态的基础调查和研究工作，开展综合性、系统性的河流动植物及生境调查，建立河流生态监测体系，推动开展河流生态保护规划。开展已建电站的环境影响后评价和河流水电开发的回顾性评价工作，为河流开发后续实施计划和优化开发方案提供经验借鉴，持续改进环境保护规划设计和管理工作。二是要加强水电项目规划、设计、建设、运行全过程监管，发挥规划环评对流域水电开发规划的指导作用；严格执行环境保护设施“三同时”制度，使环境保护措施与主体工程同时设计、同时施工、同时投入使用。工程竣工后按规定程序和要求进行环境保护专项验收。

水库移民安置

中国在水电建设取得辉煌成就的同时，也完成了大量的建设征地移民安置工作。据统计分析，至 2012 年，全国已建成和在建的 345 座大中型水电工程中，涉及征用耕地 780 万亩、安置移民约 775 万人。在建项目及规划 2030 年前建设的项目，还将涉及征用耕地约 120 万亩、安置移民约 100 万人。西部水电开发面临的移民安置工作任务将更加艰巨。

水电开发要筑坝建库，必然造成土地淹没和水库移民问题。对于人多地少的中国而言，水库淹没损失影响和移民安置问题显得十分突出。水电工程建设征地涉及土地、人口、基础设施和其他自然资源，协调建设规模、妥善安置移民是中国水电开发中需要解决的关键问题之一。

水库移民属非自愿移民。由于水库淹没集中，淹没耕地量大，迁移人口多，安置工作难度为工程类非自愿移民之首。中国水电工程所涉及的区域，绝大多数为农村地区，迁移人口也以农村人口为主，农村移民对土地的依赖性很大。中国人均占有各类用地的面积低于世界平均水平，人均耕地 1.43 亩，仅为世界平均水平 4.5 亩的 1/3；人均林地 1.8 亩，不足世界平均水平 13.6 亩的 1/7。多数地区承载人口的环境容量有限，土地资源匮乏，农村移民土地安置难度很大。

水电站建设一般需要 5～10 年，而移民搬迁、生产生活的恢复也需要一定时间，因此水电工程移民安置工作周期长。在此期间，水库淹没区所涉及的人口、实物指标和基础设施也在随时变化，移民补偿费用需要进行相应调整。大量移民集中迁出库区和迁入安置区对地方社会经济发展、基础设施的建设使用等也将产生较大冲击。受社会、资源、环境和经济条件等方面的制约，移民安置工作中，需要研究解决移民安置水平与相关区域经济发展的协调问题，包括研究处理少数民族问题、宗教文化问题和社区调整问题，广泛征求移民意愿，不断完善移民安置方案。

中国水电开发的移民安置工作大体划分为 4 个阶段，20 世纪 80 年代以前为第一阶段，80 年代至 90 年代中期为第二阶段，90 年代中期以后到 2006 年以前为第三阶段，2006 年以后为第四阶段。不同阶段，国家经济体制、法律环境不同，移民安置方式、补偿补助标准不一，安置水平存在较大差距。第一阶段以行政调拨土地资源的方式安置农村移民，补偿费用低，移民次生贫困现象较多，生产发展和生活问题都没能得到很好解决，后期遗留问题较多。

2006 年，中国政府颁布了《大中型水利水电工程建设征地补偿和移民安置条例》（国务院令 471 号）以及《国务院关于完善大中型水库移民后期扶持政策的意见》（国发〔2006〕17 号），提出了“以人为本”的移民安置政策，明确了开发性移民工作方针，确定了前期补偿、补助和后期生产扶助相结合的移民安置办法，明确了“政府领导、分级负责、县为基础、项目法人参与”的移民管理体制。在“以土为本”“以农为本”的基础上，针对土地资源和移民难以远距离搬迁的问题，部分省（市、区）研究试行按照淹没耕地逐年货币化补偿和采用其他非农途径安置移民。

水电开发和移民安置之间是相辅相成、相互促进、协调推进的关系。没有当地政府和移民群众的支持，水电建设就难以顺利推进；没有水能资源的开发利用和基础设施的

建设，当地经济也难以获得较快发展。水电开发带给移民的利益：一是地方税收增加，库区基础设施和移民住房条件得到改善；二是产业结构的调整，安置方式多样化，库区经济能够快速发展，移民生产条件得到保障；三是社会保障、补偿补助增多，就业培训转移劳动力，移民收入增加，生活水平提高；四是尊重各民族特点，重视文化传承和保护，安置区群体关系能够更加融洽。

中国水能资源富集的西部地区，也是少数民族聚集居住区。这里土地资源匮乏，耕地资源稀缺，生态环境脆弱，民族特色鲜明，宗教文化浓郁。在西部水电开发中，建设征地和移民安置工作面临诸多新情况和新挑战，更需要把移民安置工作放到突出位置，以科学发展观为指导，坚持以人为本原则，尊重移民意愿，妥善安置移民，保障其合法权益及促进移民生活更好发展。要进一步完善移民管理体制，制定移民安置工作必要的配套政策和规定，改进移民工作管理；创新移民安置方式，实行多途径安置移民，落实移民生产发展措施；加强移民安置区的社会管理，增加对困难移民的社会保障和帮扶力度，并建立科学的移民安置成效评价体系。

中国水电建设管理

水电开发必须统一认识，做好顶层设计，依法行事。统一认识就是要在一定时期，从国家战略层面，确立水电开发方针和开发目标，并予以贯彻落实。做好顶层设计就是完善法律法规，统筹协调水电开发与环境保护、移民安置、地方经济社会发展的关系，明确水电开发利益相关方的权利和责任。依法行事就是水电开发有关方面围绕目标，形成合力，千方百计努力实现既定目标，促进水电有序开发建设，服务国民经济社会发展。

改革开放以来，中国水电建设管理经验可概括为：

（1）与时俱进，遵循中国能源及电力发展战略。中国电力工业的政策方针始终将水力发电作为国家能源战略的一个重要组成部分。中华人民共和国成立初期，提出水主火辅，而后又发展为水火并举、因地制宜多搞水电；改革开放后，提出水火并举，逐步把重点放在水电上；“九五”“十五”期间，提出优化发展火电、大力发展水电、适当发展核电、同步发展电网；“十一五”规划提出“在保护生态的基础上有序开发水电”；“十二五”期间则提出积极应对气候变化，在保护生态、妥善解决移民问题的条件下，大力发展水电。

（2）推进改革，形成投资主体多元化发展格局。在改革开放和市场经济的改革思路指引下，中国水电建设管理体制改革始于20世纪70年代末，经过不断完善，逐步形成了以业主负责制、招标承包制和建设监理制为内容的三项制度，进而发展到按现代企业制度组建的项目法人负责制。发电企业集团、流域开发公司、民营投资企业以及外资企业纷纷加入到水电开发和运营的队伍中，形成了投资主体多元化发展格局，为水电开发注入了新的活力，水电开发更加灵活和有序，进一步加快了我国水电开发建设的进程。

（3）科学规划，精心设计和施工，促进水电开发的可持续发展。中国政府前后四次开展河流水能资源普查或复查工作，相对准确地摸清了全国水能资源理论蕴藏量和技术可开发条件。除雅鲁藏布江下游外，全国大江大河水电规划工作已经完成，大部分已经通过国家审查。通过科学规划布局，形成了金沙江、雅砻江、大渡河、乌江、长江上游、南盘江红水河、澜沧江、黄河下游、黄河中游、湘西、怒江、东北、闽浙赣十三大水电基地。按照水电前期工作管理要求以及项目审批核准制度，水电开发有序推进，中国东

部、中部地区水电开发基本结束，21世纪初逐步移师云南、四川和西藏，形成水电“西电东送”的格局。

(4) 统筹兼顾，力求经济效益、环境效益和社会效益的统一。推动水电合理、有序开发的科学理念，在水电开发中保护生态环境、促进地方经济发展、帮助移民群众致富，得到了社会各界的广泛认同，也成为水电界的共识。水电移民安置工作在不断摸索中取得创新，移民安置成效显著。在新的历史条件和形势下，水库移民还应与新农村建设、城镇化有机结合，推动电站所在区域经济社会较快发展和移民群众勤劳致富。**在河流水电规划**，以及水电站设计、建设和运营管理中，认真贯彻落实国家环境保护法律法规，生态环境保护不断增强，采取一系列的对策措施，减免水电开发所造成的不利环境影响，按照“在开发中保护，在保护中开发”的原则，确保水电有序开发，人与自然和谐。

(5) 科技创新，推动水电工程技术进步和重大装备国产化。改革开放之初，通过引进国外先进技术、设备和管理经验，中国迅速缩小了与发达国家在技术和管理上的差距。进入21世纪，水电开发企业依托重大工程项目，组织开展了一系列重大基础理论和关键技术的研究，取得新的突破。工程实践大大提升了中国水电开发中的坝工技术、设备制造技术和施工装备水平。中国企业研发能力、设计和施工能力、装备制造安装水平大幅提高，通过引进、消化、吸收、再创新，发挥国家重大工程的带动作用，走出了一条装备国产化的成功道路。水电建设周期大大缩短，百万千瓦级的水电站建设周期由过去的8年缩短到5～6年，大大降低了工程建设成本，提高了水电的经济效益，并增强了中国企业在国际水电建设市场的竞争力。

水电发展的形势与展望

全球气候变化、环境恶化和资源紧缺，深刻影响着人类社会的生存和发展。减少化石能源消耗、大力发展清洁能源，遏制气候变暖、拯救地球家园，是全人类共同的使命。2009年中国政府向国际社会做出了节能减排的庄严承诺：到2020年，争取非化石能源占一次能源消费的比重达到15%左右，单位国内生产总值二氧化碳排放比2005年下降40%～45%。

按照中国经济社会发展中长期规划，在坚持节约优先、提高能效、优化结构和保护环境的基础上，预测到2020年和2030年，中国能源消耗总量将分别为40亿、45亿t标准煤。以煤为主的能源消耗结构逐步得到改变，可再生能源将从目前的补充能源，提升到替代能源（2020年占15%以上）和主流能源（2030年占20%以上）的地位。水电能源量将分别达到6.5亿、9.0亿t标准煤。

为使2020年非化石能源在能源消费总量中占15%，除发展核电和风电、太阳能发电外，需要加快水电开发。2020年，中国电力装机容量将达1800GW，其中煤电、气电等化石能源装机容量约占2/3，水电、核电、风电等非化石能源装机容量约占1/3；2030年电力装机容量将达2500GW，化石能源装机容量约占55%、非化石能源装机容量约占45%。水力发电量在非化石能源供应量中，2020年占60%以上，2030年占50%以上。

中国水能资源开发的指导方针是，“在做好生态保护和移民安置的前提下，积极发展水电，重点推进西南地区大型水电站建设，因地制宜开发中小河流水能资源，科学规划建设抽水蓄能电站。”2011～2015年期间，中国计划开工建设水电120GW，新增水电装

机容量 80GW，水电年发电量 910TW·h，开发利用程度为 33%。到 2020 年，水电装机容量达到 350GW，年发电量 1200TW·h，开发利用程度达 44%。中国水电开发规划指标见表。

中国水电开发规划指标

年份	装机容量（GW）	年发电量（TW·h）	水电开发程度（%）
2015	260	910	33
2020	350	1200	44
2030	460	2000	73.5
2050	530	2400	88.2

未来中国水电开发建设的任务十分艰巨：

（1）从开发规模来看，60%以上的技术可开发量尚待开发。

（2）从开发强度来看，未来 20 年仍然将维持高强度开发，年均开工规模在 15GW 以上，新增投产 10GW。

（3）从开发条件来看，水能资源富集的西部地处高山峡谷，工程地质条件复杂，工程技术难度更大，建设成本高，工程安全问题突出。

（4）水库移民和生态环境成为制约水电开发进程的关键因素、各方利益的博弈，将使水电开发进程起起伏伏。

进入 21 世纪，安全可靠、清洁便利的电力供给已成为经济社会平稳可持续发展的重要保障。站在历史新起点上，水电开发者要认清形势，既要充分觉察水电发展面临的历史机遇，也要充分认识当前环境保护、移民安置等突出问题带来的严峻挑战，要统一思想、团结一致，认真贯彻落实科学发展观，在水电开发和运行管理中，落实好环境保护、耕地保护、移民安置、城镇化、社会主义新农村建设等方面的政策法规，主动承担社会责任，努力把水电工程打造成生态工程、民生工程、文明工程、和谐工程，造福人类社会，惠泽子孙后代。

一是要坚持可持续发展理念，以水电和谐维护社会和谐。水电开发者要按照法制化国家、市场经济与和谐社会的总要求，贯彻落实科学发展观，转变发展理念，提高认知水平，从单纯的工程水电转变到生态水电，从纯粹的技术工程转变到社会工程，更加重视移民利益和生态环境保护，把水电开发与水资源综合利用、生态工程建设和地区经济发展有机结合起来，保证国家经济建设和能源的可持续发展，以水电和谐维护社会主义和谐社会进程。

二是要坚持生态文明理念，构建水电开发的生态工程。合理有序地开发水电、保障电力供应，实现国家确定的中长期水电发展目标，必须遵循“生态优先、适度开发”和“开发中保护、保护中开发”的根本原则，进一步加大电站建设施工中的环境保护力度，完善各项环境保护措施，真正将水电开发与水资源综合利用、生态工程建设和地区经济发展结合起来，实现流域水资源的综合开发，使水电建设有利于环境保护，建设更加优美的生态环境，用科学有序的开发促进人与自然的协调发展。

三是要坚持以人为本，妥善安置移民，构建民生工程。正确处理开发水电和水库移民的关系，移民稳则建设顺，移民富则水电兴。要把妥善安置移民，保障移民合法权益，

促进移民富裕放在水电开发的突出位置。要完善移民管理体制，研究制定移民条例的必要配套政策和有关规定。创新移民安置方式，落实移民发展措施，建立扶持发展机制，着力解决好已建水电工程移民的遗留问题。使广大移民群众自觉支持和拥护水电建设，促进社会主义新农村建设，推动地方经济社会的协调发展，维护社会安定团结，着力构建水电开发的民生工程。

四是要坚持科技创新，加快水电开发技术进步。针对西部水电开发中突出的重大技术课题，开展联合攻关，提出安全可靠、经济合理、技术先进的解决方案，进一步提高水电设计施工和设备制造等技术水平。开展高坝工程抗震安全技术研究、高水头泄洪消能技术研究、高边坡复杂地基处理技术研究、大型地下洞室群围岩变形稳定控制技术研究。通过超大型水轮发电机组集成技术研究，提高高水头、大容量水轮发电机组的设计制造能力，研究解决高原、高寒、大容量、长距离输电关键技术和设备可靠性问题。

五是要坚持流域综合、梯级统一管理，实现综合效益最大化。深入推进流域梯级开发与统一调度，实现水电开发综合效益。要认真总结流域开发的经验，坚持流域梯级开发方针，搞好流域梯级联合统一调度和科学调度。以提高和保证社会效益、经济效益、电网安全运行为目的，在合理解决发电与水利之间，部门与部门之间，上下游和相邻省区之间，电站和电网之间利益、矛盾的基础上，加快进行流域梯级统一调度的研究，利用现代化网络技术和信息技术提升流域梯级统一管理水平，使其更好地服务经济社会平稳较快发展。

六是要不断完善水电建设管理，促进水电持续健康发展。针对水电开发面临的新形势和新任务，解决影响水电进一步发展的体制机制问题；研究制定水电开发管理条例，明确水电开发的有关要求，进一步规范水电开发秩序；完善水电项目建设管理程序和办法；根据电价改革的目标和方向，按照市场经济要求，制定水电的合理定价机制，积极推动竞价上网；研究完善水电开发相关政策，将水电开发与移民脱贫致富、地方经济社会发展更好地结合起来，使水电开发更好地带动一方经济，造福一方百姓。

过去百年，中国水电事业经历了不平凡的曲折道路。改革开放后，水电事业出现新一轮高潮，建设成就举世瞩目，水电工程技术引领全球。未来，中国水电开发建设任重道远，水电事业前景光明。我们相信，只要树立全面、协调和可持续发展理念，切实增强以人为本意识、改革创新意识和科学发展意识，正确处理水电开发与环境保护和移民安置的关系，运营好已经建成的数百座大中型水电站和成千上万座小水电站，确保水能资源的永续利用，就一定能够实现水电开发可持续发展，实现国民经济社会健康发展和节能减排的宏伟目标。

• 水力发电卷 •

第一版前言

水力发电是电力工业的一个门类。水力发电的任务是经济合理地开发水能资源，兴建水电站，与电力系统中其他类型的发电厂相互配合运行，满足城乡用电需求。水电站包括利用河川水能资源发电的常规水电站以及潮汐电站和抽水蓄能电站，是电力系统的一个重要组成部分。在电力系统装机容量中，一定比重的水电装机容量，对系统调峰和安全经济运行极为有利。水电站的水库可以综合利用，如：防洪、防凌；向农村和城市供水，满足农田灌溉、工业和生活用水的需求；在水库上下游形成良好的通航航道，发展航运；发展养殖业；发展旅游业等等。水能资源是再生能源，永无穷尽。实践证明，常规水电站的发电成本远低于以煤、油为燃料的火力发电厂和核裂变电厂，而且不排放有害气体和烟尘，也没有核污染，所以发达国家大多尽量先开发水电。全世界河川水能资源理论蕴藏量约为35万亿kW·h/a，技术可开发资源约为15万亿kW·h/a，经济可开发资源约为9.35万亿kW·h/a。到1989年底，以年发电量计，大多数西方发达国家，已开发的水能资源量达到了其拥有的可开发水能资源量的50%以上，其中，法国为96.7%，瑞士为74.7%，联邦德国为73.3%，瑞典为71.5%。中国河川水能资源丰富，理论蕴藏量为5.92万亿kW·h/a，技术可开发资源为1.92亿kW·h/a，经济可开发资源为1.26万亿kW·h/a。到1991年，水电装机容量为3788.35万kW，水电年发电量为1248.45亿kW·h。

19世纪晚期，世界上出现的第一批水电站，单站容量只有十几千瓦。随着水电站工程建设技术、水轮发电机组制造技术和输电技术的进步，单机容量不断增大，目前世界上单机最大的混流式水轮机额定出力为716MW，最大的轴流转桨式水轮机额定出力为230MW，最大的水斗式水轮机额定出力为315MW，最大的斜流式水轮机额定出力为215MW，最大的单级混流可逆水泵水轮机额定出力为380MW；最大的立式水轮发电机额定容量为824MV·A，最大的抽水蓄能发电电动机额定容量为390MV·A。单个水电站的装机容量也在不断增大，例如，巴西和巴拉圭的伊泰普水电站装机容量为12600 MW，中国正在兴建的长江三峡水利枢纽设计装机容量为18200 MW。虽然如此，人们建造小型水电站甚至微型水电站的兴趣却未减弱。这是因为，小水电资源分散，对生态环境负影响极小，技术成熟，投资少，易于修建，因而适宜于农村和山区，特别是发展中国家的农村和山区。中国的小水电资源十分丰富，理论蕴藏量约为1.5亿kW，可开发容量约为7000多万kW，相应年发电量约为2000亿～2500亿kW·h。到1991年底，中国小水电总装机容量已达1344.6万kW，年发电量为371亿kW·h。

《中国电力百科全书》按专业门类，分成既相对独立又有联系的8卷，但为了避免各卷过多重复，对多数卷中都涉及的知识，从整体上进行了划分，某一知识规定在某相关专业的卷中系统全面介绍，其他各卷则只介绍这一知识在本卷专业方面的有关特

点。例如，电工技术的基本知识、基本理论、基本方法、电工材料等划分在电工技术基础卷，输配电线路、过电压及绝缘配合、电气设备及变电所设施等划分在输电与配电卷，继电保护装置、通信设备等划分在电力系统卷，电气照明、电动机等划分在用电卷等等。水力发电卷作为《中国电力百科全书》的一个组成部分，在“电”的理论、电厂电气部分设计和计算方法以及电气设备等方面，考虑了与其他各卷协调配合问题。对知名度较高而本卷必须列入的知识内容，单独设置条目，着重介绍水力发电方面的特点，而对有关卷中交叉划分的知识内容，建立参见，以备读者查阅。

水力发电卷分 11 个分支，全面介绍水力发电理论和技术的基本知识，包括基础理论、基本情况、科研试验、勘测设计、土建施工、设备安装以及运行管理等方面。各分支内容概括如下：

（1）概论分支从水力发电、水能资源、水能规划、水库和水电站等方面介绍有关水力发电的宏观知识，并且分别介绍了中国各大水系和世界各大洲水能资源的状况，以及中国各大江河的梯级规划。由于资料难以搜集全面，有关台湾省的水能资源和水能规划内容暂缺。

（2）气象、水文、泥沙分支和力学基础分支，介绍除电学以外的有关水力发电的理论基础。

（3）勘测设计和科研试验技术分支、水能利用分支、环境保护及水库淹没分支和水工建筑物分支，介绍除机电和施工组织设计以外的有关水电站的基本知识。为介绍水电站水能与电力系统电力、电量需求的关系，在水能利用分支，设置了相应条目。

（4）水电站工程施工分支，介绍水电站施工技术方面的主要知识和施工组织设计方面的主要概念。

（5）水电站机电部分分支，介绍水轮发电机组、油气水系统、电气一次回路、电气二次回路、水电站通信、水电站自动化等方面的主要技术知识和设备安装知识。按照各卷上述内容范围划分的原则，有关过电压保护、接地、电气设备、继电器及继电保护、开关站布置等方面的内容，本卷只设综合条目，作概要介绍并着重反映有水电站特色的内容。关于主接线，除一般叙述外，对水电站可能采用的接线，设置了相应条目。此外，水电站的金属结构安装和采暖通风方面的知识也在这个分支中介绍。

（6）水电站运行管理分支概略介绍运行管理和维护检修方面的主要知识。

（7）国内外水电站实例分支，列举介绍了中外 55 座大型常规水电站（中国 250 MW 及以上，外国2000 MW 及以上）、4 座潮汐电站、16 座抽水蓄能电站以及中国 6 条中小河流的梯级水电站。

在本卷的编撰过程中，得到了电力系统内外众多单位的帮助和支持，特别是水利水电规划设计总院、水利信息中心、水利水电科学研究院、华北电业管理局、清华大学、电力工业部南京自动化研究所、北京勘测设计研究院、昆明勘测设计研究院、成都勘测设计研究院、华东勘测设计研究院、天津勘测设计研究院、中国水利水电工程总公司等单位，在此谨表示诚挚的感谢。

水力发电卷（第一版）编审委员会

1994 年 6 月

• 水力发电卷 •

第二版前言

自《中国电力百科全书》出版以来，水电站工程建设技术、水轮发电机组制造技术和输电技术有了进一步的发展。国际上对环境保护的要求日益严格，促使对可再生能源的需求有了新的增长。特别在发展中国家，如巴西、乌拉圭等，加快了水力发电工程的建设步伐。世界坝工建设技术也有了重大的进展，混凝土面板堆石坝和碾压混凝土筑坝技术的发展大大加快了大坝的建设速度，一批高坝相继建成，如墨西哥的阿瓜米尔巴（Aguamilpa）混凝土面板堆石坝坝高达 187m。水电站自动化运行监控技术和水情自动测报技术等都有了长足的进步。中国水电工程建设规模在世界水电建设中已占有重要份额，一批具有世界先进技术水平的水电工程相继建设和投产，如：装机容量达 1820 万 kW、居世界首位的长江三峡工程已于 1997 年 11 月实现大江截流，进入二期施工阶段，计划于 2003 年首批机组投产发电；坝高达 240m 的二滩水电站双曲拱坝已建成，电站规模达 330 万 kW；天生桥一级水电站混凝土面板堆石坝高达 178m，居世界同类型大坝的第二位，也以较快的速度建成；中国还正在建设世界最高的沙牌水电站碾压混凝土拱坝，坝高 132m；中国水电站管理水平也有了较大的提高，新建成的水电站已普遍实现了“无人值班”（少人值守）的运行管理方式。中国水电科研工作也取得了丰硕的成果，解决了 300m 级高坝，高水头、大流量泄洪建筑物建设，复杂地基处理和大型地下洞室施工以及大型机组设计、制造等关键技术；随着电网对调峰、调频和事故备用的需求日益增长，中国建成了总装机容量达 240 万 kW 的广州抽水蓄能电站和其他一批大型抽水蓄能电站。到 1999 年底，中国水电装机容量为 7297 万 kW，水电年发电量为 2129 亿 kW · h，其规模跃居世界第二位。展望将来，中国的水电站建设方兴未艾，西部大开发战略和“西电东送”的方针将促进一批装机规模 400 万 kW 至 1200 万 kW 的大型工程相继立项建设。

水力发电卷第一版共有 11 个分支。水力发电卷第二版则为 13 个分支，其中水库淹没分支和工程造价分支分别从第一版的环境保护及水库淹没分支和水能利用分支中分离出来单独设置的，并相应增补了有关的条目。第一版的勘测设计和科研试验技术分支的内容也作了少量的调整并更名为勘测和试验技术分支，同时删去了个别已不再使用的试验技术的有关条目。对其他分支部分内容也作了必要的更新和补充，以适应客观情况的变化，并尽可能反映现代水力发电科学技术和管理的新水平。水电站实例分支还增补了中国近期拟建的大型水电站和大型抽水蓄能电站的条目。

水力发电卷（第二版）的编撰工作由国家电力公司水电水利规划设计总院和中国水利水电科学研究院具体组织中国水利水电工作者完成。

水力发电卷（第二版）编审委员会

2000 年 11 月

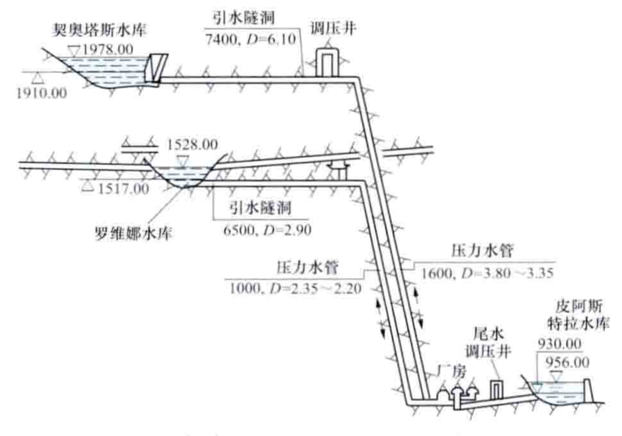
目　　录



A'ertuogesuo Choushui Xuneng Dianzhan

阿尔托格索抽水蓄能电站 （Alto-Gesso Pumped Storage Power Station） 位于意大利皮埃蒙省西南部阿尔卑斯山区，在都灵市以南 75km 处。电站装机容量 1317MW，以 380kV 超高压输电线路接入意大利国家电力系统，承担系统内调峰任务和备用容量。

枢纽布置 枢纽工程由上水库、下水库、水道系统、厂房等组成，见图。



阿尔托格索抽水蓄能电站纵剖面（单位：m）

上水库和下水库 电站设有 2 座上水库和 1 座下水库。

契奥塔斯（Chiotas）上水库，坝址以上流域面积 11.6km²，建有 2 座大坝。主坝为重力拱坝，最大坝高 130m。副坝为重力坝，最大坝高 30m。正常蓄水位 1978.00m，低水位 1910.00m，调节库容 2730 万 m³，可进行季调节。

罗维娜（Rovina）上水库系壅高天然湖泊水位而成，正常蓄水位 1528.00m，低水位 1517.00m，调节库容 120 万 m³，仅能进行日调节。

下水库利用 1965 年建成蓄水的皮阿斯特拉（Piastra）水库。混凝土重力坝高 88m，正常蓄水位 956.00m，低水位 930.00m，调节库容 900 万 m³。

水道系统 包括上游引水系统和尾水输水系统。

上游引水系统：契奥塔斯上水库的发电进水口设在左岸，引水隧洞全长 7400m，圆形断面，内径 6.10m，最大发电流量 128m³/s，最大抽水流量 120m³/s，末端设双井筒差动式调压井。在调压井下游 70m 处分岔为 2 条压力钢管。压力钢管坡度为 42°，壁厚 17～57mm，内径 3.35～3.80m，长 1500m。每条压力钢管分成 4 条支管，接至机组。

罗维娜上水库的引水隧洞全长 6500m，内径 2.90m，最大发电流量 27m³/s，最大抽水流量 20m³/s，末端设差动式双筒调压井。下接压力钢管全长 1000m，其内径由 2.35m 渐减至 2.20m，壁厚由 9mm 渐增至 45mm。钢管的下部 2/3 段用加劲环加固。

尾水输水系统：2 条支洞与尾水洞相连接，内径 6.5m，全长 500m。设 1 座双井筒差动式调压井。

厂房 地下厂房内安装 9 台抽水蓄能机组，其中 8 台由契奥塔斯上水库引水的为可逆式水泵水轮机，1 台由罗维娜上水库引水的为三机式机组。厂房总长 195m，宽 15.2m，高 40m。上游侧设球阀室。厂房下游侧设变压器室，长 168m，宽 16m，高 15m。

8 台四级可逆式水泵水轮机。发电工况下最高水头 1048m，每台最大流量 16m³/s，最大出力 148MW，转速 600r/min。水泵工况下，最高水头 955m，每台最大抽水流量 15m³/s，最大输入功率 155MW。发电电动机的发电功率 170MV·A，装有晶闸管励磁装置。

1 台三机式机组，由发电电动机、混流式水轮机和二级式水泵组成。混流式水轮机最大水头 598m，最大流量 26.95m³/s，最大出力 133.67MW，转速 600r/min。二级式水泵最小扬程 561m，最大流量 19.44m³/s，抽水功率 124.92MW。发电电动机容量为 150MV·A。变压器洞室内装有 5 台 17kV/380kV 的水冷式三相变压器。电站通过 45km 以外的控制中心实行遥控。

工程施工 工程于 1976 年 6 月开工，1980 年第一台机组发电，1981 年底竣工。

Ankang Shuidianzhan

安康水电站 （Ankang Hydropower Station） 位于长江支流汉江上游，距陕西省安康市 18km。电站开发任务以发电为主，兼有航运、防洪、养殖等综合利用效益，见图 1。电站装机容量 800MW，年发电量 28 亿 kW·h。电站以 330kV 输电线路 3 回和 110kV 输电线路 4 回接入陕西省电力系统，担负系统调峰任务。



图 1 安康水电站

水文和水库特性 坝址以上流域面积 35 700km²，多年平均流量 608m³/s，年平均输沙量 2710 万 t。水库正常蓄水位 330.00m，相应库容 25.8 亿 m³；死水位 300.00m，调节库容 16.7 亿 m³。水库具有季调节性能。工程按 1000 年一遇洪水 36 700m³/s 设计，10 000 年一遇洪水 45 000m³/s 校核，相应库水位分别为 333.10m 和 337.05m，相应泄洪流量分别

为 31 500m^3/s 和 37 600m^3/s。水库总库容 29.25 亿 m^3，防洪限制水位 325.00m，防洪库容 3.4 亿 m^3。

工程地质条件 坝址区出露岩层为奥陶系、寒武系、震旦系，岩性复杂，主要为千枚岩、板岩、页岩等。饱和抗压强度一般为 30～60MPa。断层、裂隙发育，坝址区有断层 100 多条，经勘探和坝基开挖发现，坝基下存在连续面较长的缓倾角（倾角小于 30°）断层，且结构面普遍含泥，摩擦系数仅为 0.3～0.35。坝址两岸岩石风化深达 20～60m，存在 10 多处天然滑坡体和松动倾倒体。坝址地震基本烈度为Ⅶ度，大坝按 8 度设防。

枢纽布置 枢纽工程由大坝、泄水建筑物、厂房和通航建筑物等组成，见图 2。

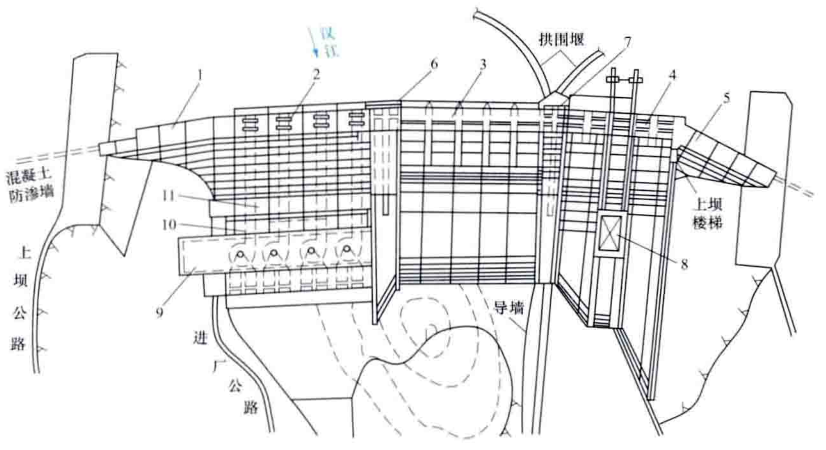


图 2 安康水电站枢纽平面布置图

1—右岸非溢流坝段；2—厂房坝段；3—表孔坝段；4—中孔坝段；5—左岸非溢流坝段；6—小导墙底孔；7—大导墙底孔；8—升船机；9—厂房；10—中央控制室楼；11—配电大楼

大坝 混凝土重力坝，折线形布置，坝轴线由 5 段折线组成，全长 541.5m。坝顶高程 338.00m，最大坝高 128m。在坝趾开挖 15m 深大齿槽，采用洞塞混凝土置换坝基下约 10 000m^3 的断层破碎带，以保证大坝抗滑稳定。采取设置锚筋桩、混凝土锚固桩等措施，以保证山坡稳定。

泄水建筑物 溢流坝表孔 5 个，孔口尺寸 15m×17m，设计洪水位时泄流量 14 010m^3/s；坝身中孔 5 个，孔口尺寸 11m×12m，设计洪水位时泄流量 11123m^3/s；4 个底孔，孔口尺寸 5m×8m，设计洪水位时泄流量 4654m^3/s。采用宽尾墩与消力池相结合、曲线形贴角斜鼻坎挑流的联合消能方式。

厂房 厂房布置在坝后，长 132.55m、宽 22.9m、高 52.9m。厂内装有 4 台 200MW 混流式水轮发电机组。水轮机转轮直径 5.50m，额定转速 107r/min，额定出力 204.1MW，单机引用流量 304m^3/s。发电机为半伞式空冷型，额定电压 13.8kV，额定容量 228.6MV·A，额定功率因数 0.875。采用气体绝缘金属封闭电器，布置在厂坝间的配电大楼内。

通航建筑物 垂直升船机，设计过坝船只为 100t 级分节驳船，年货运能力为 45 万～50 万 t。

工程施工 工程于 1978 年开工，1989 年下闸蓄水，1990 年第一台机组发电，1992 年 4 台机组全部投运。

主要工程量：土石方开挖填筑 793 万 m^3，混凝土及钢筋混凝土浇筑 321.5 万 m^3，金属结构安装 1.1 万 t，基础灌浆和排水孔 22 万 m，接缝灌浆 15.3 万 m^2。

设计单位 北京勘测设计研究院（现中国水电顾问集团北京勘测设计研究院）。

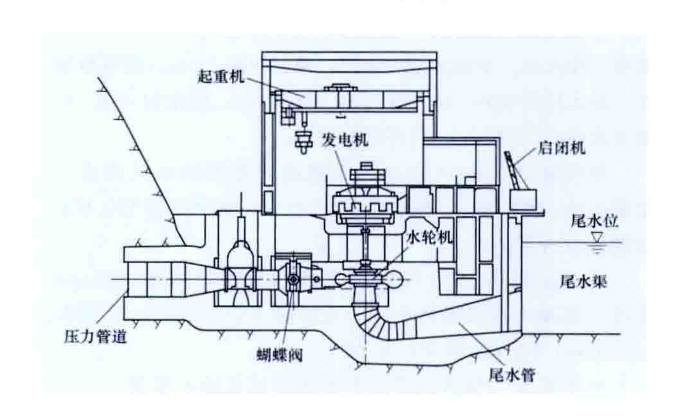
anbianshi changfang

岸边式厂房 (power house on river bank) 位于拦河坝下游河岸边的地面厂房，适用于各种坝型。岸边式厂房横剖面见下图。

引水道及压力管道有的埋设于地下，有的明铺于地面。当引水道及压力管道较长或由主干压力管道向多台机组引水时，通常在每台水轮机前的压力管道上安装有闸阀，以供机组检修或紧急状态时快速关闭，切断水流。闸阀型式根据水头大小及管道直径选择，有蝴蝶阀、球阀等，它们有的安装在主厂房内，有的安装在专门的阀室内。

厂房位置根据引水系统布置，厂区地形、地质条件以及可获得水头大小等情况，经技术经济比较确定。当水电站主要由拦河坝壅水集中河道落差时，厂房靠近拦河坝，引水道较短；当水电站主要由引水道来集中河道落差时，引水道较长，通常设有调压室。若以明流引水，需在压力管道进口前设置压力前池，以调节水流。副厂房、主变压器场、户外开关站等根据厂区地形、地质及对外交通等情况因地制宜布置，一般可以选择的部位有：①厂房端部进厂交通道路近旁场地。②尾水管扩散段上部和尾水平台。③厂房与山坡之间的可利用空间。④厂房屋顶上。

厂区设计要点：①位于高边坡下的岸边式厂房，要对边坡的稳定性进行论证，确定必须采取的工程措施，防止滑坡及危岩坠落。有的厂房屋顶采用承重结构，设有耐坠石冲砸的垫层。②对可能遭受山洪、泥石流破坏的建筑物和交通道路等设施，应采取相应的治理防护措施。③交通道路设施要满足各建筑物管理和设备运输需要。④根据本地区暴雨强度和设计标准，设置排水沟网等排水设施。⑤尾水渠与河道连接处要避免有碍发电的回流、淤积和河水顶托。



岸边式厂房横剖面图

anbian yihongdao

岸边溢洪道 (chute spillway) 布置在坝肩或岸边离坝一定距离的表孔泄水建筑物。又称溢洪道。岸边溢洪道

由上游引水渠、控制段、泄流段、消能工和下游退水渠组成，主要用于宣泄洪水。受地形条件的限制，有的工程采用岸边溢洪洞的形式。例如，大渡河猴子岩水电站右岸布置1条溢洪洞，采取“前隧洞、后明槽”的布置形式，由开敞式进口段、无压隧洞段、明渠泄槽段和出口挑流鼻坎段组成。

上游引水渠　沟通水库和控制段之间的连接渠道，要求有足够的过水断面和合理的线路布置，尽量减少水头损失；为保证水流均匀进入控制段，在其上游应有一段直线段。

控制段　起控制溢洪道下泄流量的作用。控制段也是挡水结构，因此按闸坝建筑物设计，以满足应力、稳定和防渗要求。控制段按堰流方式可分为平底堰（宽顶堰）、驼峰式低堰、标准实用堰，见图1。堰顶可设或不设闸门。闸门上可设或不设胸墙。当设多孔闸门时，宜均匀同步开启，以防陡槽内出现较大的冲击波，水流翻越边墙而造成危害。

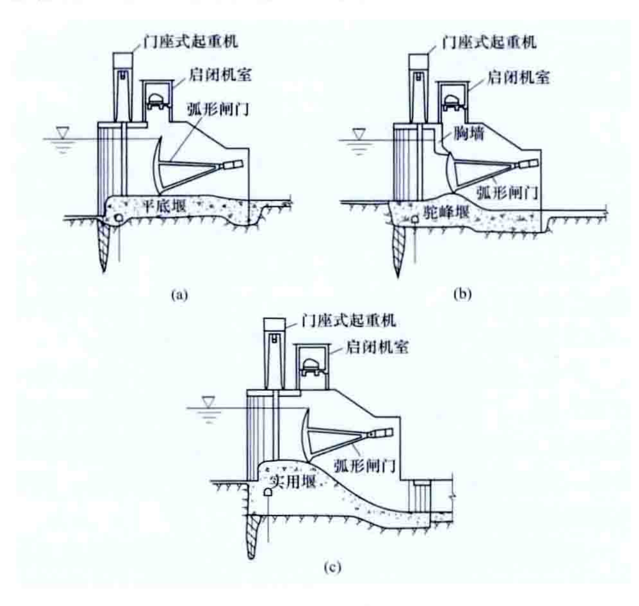


图1　控制段布置

(a) 平底堰（宽顶堰）；(b) 驼峰式低堰；(c) 标准实用堰

泄流段　控制段下游通过高速水流的水道。它根据不同的布置和地形条件有滑雪道、陡槽和隧洞三种形式。滑雪道是将泄水道支承在高出岸坡的混凝土构架或实体结构上，岸坡开挖较少。陡槽是建基在岸坡岩体上的泄水道，过水表面用混凝土衬护，水面以下的边坡一般为垂直或接近垂直，对水流条件和节省开挖均有利。当岸坡高陡时，泄流段也可采用无压隧洞的形式。泄流段在平面布置上均宜采用直线，只有在受地形限制，为使水流顺利归槽时才采用弯道布置。弯道半径不宜太小，并应设渠底横向坡，以减少弯道水流冲击波。弯道半径和渠底横坡一般适应某一范围的流量，当流量变化较大时，流态将变差。泄流段一般沿长度等宽布置，也可采用逐渐收缩的布置以减少工程量，或采用逐渐扩散的布置以减少出口段的单宽流量。

消能工　岸边溢洪道多采用挑流消能，除节省投资外，其消能冲刷区远离坝趾和厂房，挑流所造成的河床冲刷、雾化、回流及水位波动等问题对主体工程影响较小。其他消能方式在地形、地质条件适合时也可采用，但投资较高。

下游退水渠　消能工至下游河槽之间的连接水道。岸边溢洪道的消能工和泄流段衬护应注意防止空蚀和动水压力掀动破坏，除需做好表面施工平整外，尚应在衬砌分缝处设止水，并在基础下设排水措施。

岸边溢洪道一般利用岸坡天然台地布置，也可利用河流弯道或水库岸边的垭口地形布置，这种溢洪道在施工中与大坝无相互干扰。根据布置特征，岸边溢洪道分正槽溢洪道、侧槽溢洪道和井式溢洪道，见图2。

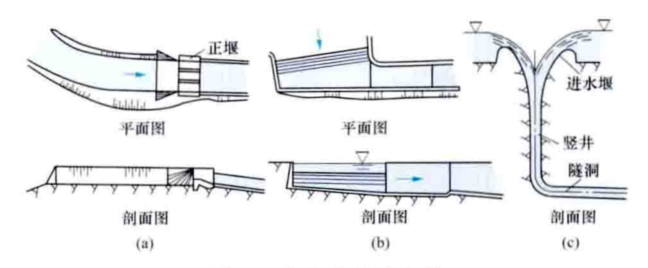


图2　岸边溢洪道布置

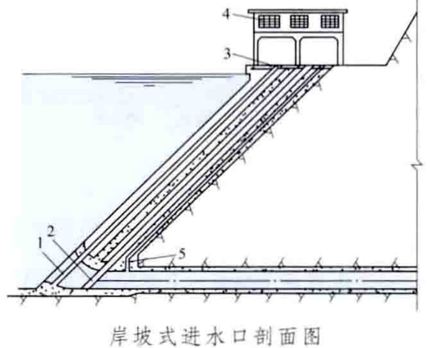
(a) 正槽溢洪道；(b) 侧槽溢洪道；(c) 井式溢洪道

正槽溢洪道的进口水流从正面进入溢洪道的泄流段，首部设正堰，布置和水流条件均较简单，工程中采用较多。侧槽溢洪道的进口水流通过在首部设置的侧槽进入陡槽泄流段。当坝址两岸山势陡峻而又需要较大的溢流前缘长度时，可顺岸边布置侧槽溢洪道，以便加长进流长度。这种溢洪道的布置和水流条件均较正槽溢洪道复杂，溢流前缘底部宜稍加深，以保证侧堰流态稳定，侧槽尺寸和底坡应满足消能和水流转向、平稳进入陡槽的要求。侧堰可设或不设闸门。井式溢洪道属岸边溢洪道的特殊布置形式，进水堰轴线为环形或弧形，水流经环形进水堰流入竖井，下接隧洞。

anposhi jinshuikou

岸坡式进水口 (intake with inclined gate slots at bank)

闸门门槽（含拦污栅槽）贴靠倾斜岸坡布置的水电站进水口。拦污栅一般布置在喇叭口上游端，为了使布置紧凑并节省工程量，拦污栅和检修闸门也可共槽布置，由设在塔顶的启闭机操作。启闭机检修平台设在最高库水位以上，见图。



岸坡式进水口剖面图

1—拦污栅；2—闸门槽；3—工作平台；4—启闭机室；5—通气孔

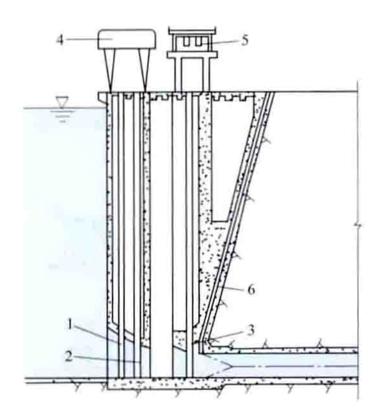
岸坡式进水口布置因地制宜，充分利用了进水塔所在地的地形、地质条件，施工比较简单，工程量较小。但由于闸门门槽和拦污栅槽是倾斜布置，同等流速条件下闸门、拦污栅尺寸加大，启闭容量也相应增大，因此岸坡式进水口布置时岸坡坡度要适当。

antashi jinshuikou

岸塔式进水口 (intake tower built against bank)

背靠岸坡布置，闸门设在塔形结构中，可兼做岸坡支挡结构的水电站进水口。在岸塔式进水口内，根据对引水发电系统

安全保护的要求，一般设有拦污栅、检修闸门、事故闸门（工作闸门或快速闸门）和通气孔等，见图。检修闸门可以单独设槽，亦可与拦污栅共槽；为满足对过栅流速的要求，拦污栅布置在进口喇叭段的上游端。启闭机检修平台设在最高库水位以上，拦污栅和闸门由设在塔顶工作平台上的启闭机操作。塔体结构可根据塔基地形、地质条件和边坡开挖情况，在下部与岸坡相连，到上部与岸坡分离。塔顶设工作桥与岸边或与坝顶相连。



岸塔式进水口剖面图

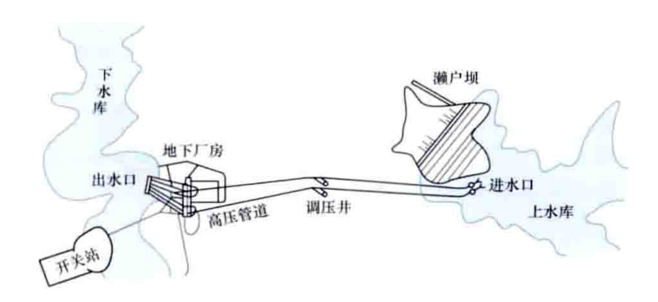
1—拦污栅；2—检修闸门；3—事故闸门（工作闸门或快速闸门）；4—门座式起重机；5—启闭机室；6—通气孔

Aojiye Choushui Xuneng Dianzhan

奥吉野抽水蓄能电站（Okuyoshino Pumped Storage Power Station） 位于日本纪伊半岛中部的奈良县。装机容量1206MW。电站对电力系统调峰、事故备用及系统频率改善具有很大作用。电站用2回500kV 90km长输电线在南部京都变电站与关西电力公司的500kV电网连接。

工程地质条件 上水库坝址区岩性为砂岩和页岩，河床部分为坚硬砂岩。下水库坝址为砂岩与页岩互层，坝高2/3处左、右岸有宽约40m的断层带。

枢纽布置 枢纽工程由上水库、下水库、水道系统、厂房等组成，见图。



奥吉野抽水蓄能电站枢纽平面布置图

上水库和下水库 下水库修建于新宫河系津川的支流旭日河上，上水库修建于旭日河的支流濑户川上。上、下水库水平距离1700m，最大毛水头526.9m。上、下水库有效库容均为1250万m^3，设计净水头505m，发电最大引用流量288m^3/s，规划水库可供发电12h以上。

上水库大坝为黏土心墙堆石坝，最高蓄水位960.00m，工作水深34m。最大坝高110.5m，坝顶宽11m、长346m，上游坡坡度为1∶2.5，下游坡坡度为1∶2.0。心墙顶宽4m，上游坡坡度为1∶0.3，下游为垂直。大坝右岸设一泄量为230m^3/s的溢洪道。

下水库大坝为一不对称的混凝土双曲圆拱坝，最高蓄水位462.00m，工作水深32m，最大坝高86.1m，坝顶长199m、顶宽3m、底宽19m。坝顶中央设泄量为1200m^3/s的溢洪道，还设一个泄量为78m^3/s的活门射流孔排放浑水，以及一个泄量为7.7m^3/s的清水供水孔。

水道系统 上进/出水口为侧面进水式，底板高程898.00m。两条圆形压力引水隧洞长679.6m，内径5.3m，纵坡2%，钢筋混凝土衬砌厚0.4m。两条引水道各设一个调压井，布置为L形。井高82.3m，内径5.3m，钢筋混凝土衬砌厚0.6m，下室长60m。

高压管道由2根主管和各自3根支管组成，主管支管间为四通球岔，球岔直径7m。主管内径4.3m，支管内径由2.7m变至1.8m，长50m。管道周围岩层为页岩和薄层砂岩互层。内压8.4MPa，钢板衬砌，管壁最大厚度为50mm。

尾水隧洞长156m，一机一洞。洞呈圆形，钢筋混凝土衬砌，内径3.1m，衬砌厚0.3m。下进/出水口闸门槽为1∶0.7斜坡式，拦污栅处设防涡混凝土梁及钢顶板。

厂房 地下厂房埋深约180m，宽20.0m，高41.6m，长157.8m。厂房内安装6台单机容量为201MW的可逆混流式水泵水轮机和发电电动机机组。进入机组前安装球形进水阀。主变压器洞垂直于主厂房。开关站在厂房对岸，出线为高压电缆通过库底隧洞相连。

水泵水轮机为立轴混流单机可逆式，电动发电机为三相交流全封闭气冷。水轮机单机最大出力207MW，水泵输入功率214MW，转速514r/min，转轮直径3.75m。最大发电水头526m，最大抽水水头539m，额定水头475m，发电流量45.1m^3/s，抽水流量39.4m^3/s，吸出高度−70m。两台变频起动装置，频率60Hz。电站主接线低压侧为扩大单元，两台分裂变压器，高压侧双母线，四角形接线两进两出，SF_6气体绝缘开关。变压器每台容量680MV·A，电压11kV。

工程施工 电站于1975年4月开工，1978年6月第一台机组投运，1980年2月6台机组全部投产。

主要工程量：地下厂房开挖24.3万m^3，混凝土9.6万m^3，钢筋4500t。



Bagong Shuidianzhan

巴贡水电站 (Bakun Hydropower Station) 位于马来西亚沙捞越州中部拉让(Rajang)江支流巴鲁伊(Balui)河上，公路距港口城市民都鲁(Bintulu)180km。电站开发任务主要为发电，装机容量2400MW，多年平均年发电量155.17亿kW·h，见图1。



图1 巴贡水电站

水文和水库特性 坝址以上流域面积约14 750km²，多年平均流量为1314m³/s，多年平均降雨量4500mm。可能最大洪水流量32 367m³/s，总库容440亿m³，水库最高运行水位(正常蓄水位)228.00m，最低运行水位195.00m，可能最大洪水情况下水库最高水位233.00m。水库具有年调节性能。

地形地质条件 坝址区最高地面动峰值设计加速度，大坝为0.12g，其他水工建筑物为0.10g。坝址区河道基本顺直，河谷基本对称，两岸岸坡为岩质岸坡，岸坡坡度为25°～60°。坝基岩性以杂砂岩为主，约占60%；其次为页岩和页岩与杂砂岩的互层结构，约占40%。

枢纽布置 枢纽工程由大坝、泄水建筑物和引水发电系统等组成，见图2。

大坝 混凝土面板堆石坝，坝顶高程235.00m，最大坝高205m；坝顶长740m，顶宽12m，底宽574m；上游边坡坡度为1∶1.4，下游综合边坡坡度为1∶1.52，实坡为1∶1.3。混凝土面板面积约14万m²，面板厚度从坝顶的30cm逐渐变至坝底的93cm，面板宽15m。混凝土趾板长1080m，宽5～10m，大坝体积1550万m³。

泄水建筑物 溢洪道分4孔，每孔净宽15m，设15.00m×20.09m弧形闸门，堰顶高程209.00m。泄槽长608m，坡度分别为6%、14%和25%，泄槽宽从起点的72m逐渐收缩到50m。泄槽最大泄量14 600m³/s，采用挑流鼻坎消能。放水孔由1号导流洞改建，在水库蓄水期间向下游供水的建筑物，在机组投入运行或溢洪道具备向下游供水条件时封堵。放水孔设计向下游供水流量150m³/s，设计最大运行水头183m。设两个锥阀，锥阀上游设蝶阀，锥阀直径1.92m，蝶阀直径2.3m。

引水发电系统 主厂房为地面厂房，位于左岸，引水发电系统采用一机一洞的布置方式。发电洞内径均为8.5m，衬砌厚度一般为70cm。压力洞最后约200m采用钢衬，内径7.0m。设8台容量为300MW的混流式水轮机，单机额定引用流量为208m³/s，设计水头174.8m。安装间布置在厂房的右侧。

工程施工 采用河床一次断流、右岸隧洞导流、基坑全年施工的导流方式。一期上游围堰为土石围堰，按20年一遇防洪标准设计。中后期采用面板堆石坝挡水度汛，按500年一遇防洪标准设计。下游围堰为土石围堰，按50年一遇防洪标准设计。

工程于2002年10月开工，2011年8月第一台机组正式发电投产，2011年10月放水孔下闸封堵，工程进入竣工阶段。

主要工程量：大坝总填筑量1728万m³，混凝土面板面

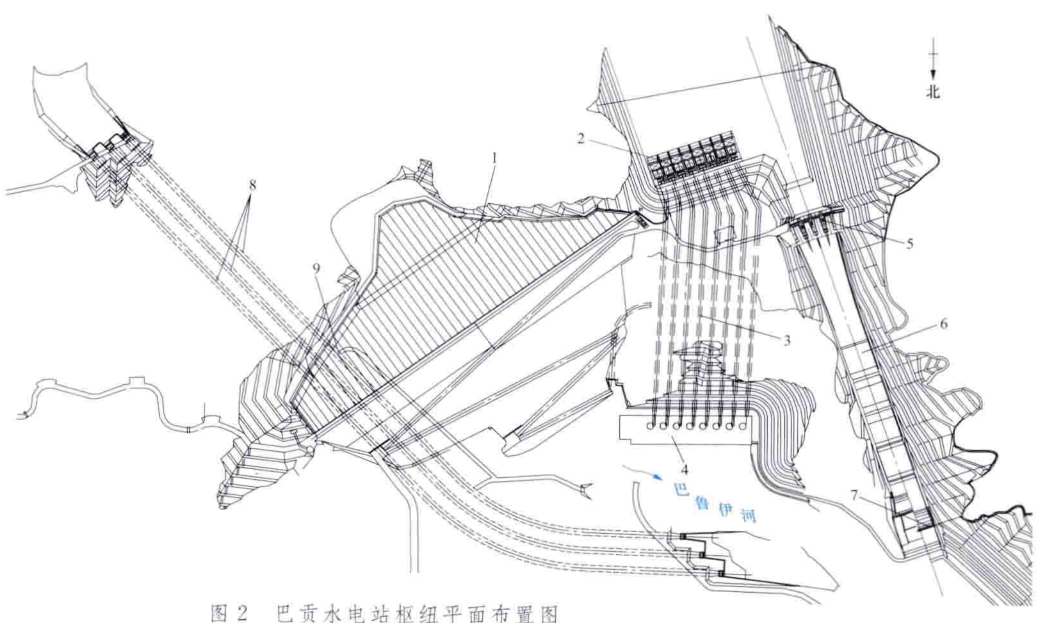


图2 巴贡水电站枢纽平面布置图

1—混凝土面板堆石坝；2—进水口；3—引水隧洞；4—厂房；5—溢洪道堰闸段；6—溢洪道泄槽；7—溢洪道挑流鼻坎；8—导流洞；9—放水孔

积约 14 万 m^2，帷幕最大深度 140m，混凝土浇筑约 120 万 m^3。

设计单位 中国水电顾问集团公司西北勘测设计研究院承担施工图阶段设计。

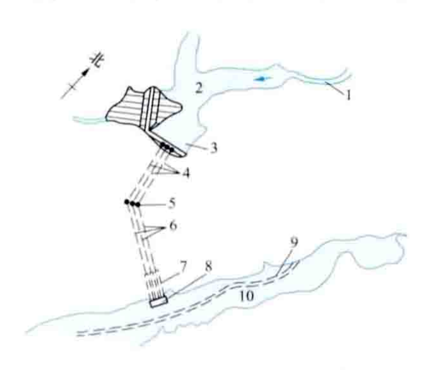
建设单位 马来西亚沙捞越州电力公司。

Basikangdi Choushui Xuneng Dianzhan

巴斯康蒂抽水蓄能电站 (Bath County Pumped Storage Power Station)

位于美国弗吉尼亚州西部山区，属纯抽水蓄能电站。电站装机容量 2100MW，升级改造后总装机容量达 2772MW。输电电压 500kV。

工程地质 上水库库区、坝址、进水口、上引水隧洞和调压井上半段均为砂岩、粉砂岩和页岩互层，地质条件良好。下水库库区、坝址、进水口、压力钢管和下引水隧洞主要为薄层粉砂岩、砂岩和黏土岩，地质条件相对较差。



巴斯康蒂抽水蓄能电站平面布置图
1—小巴克溪；2—上水库；3—进水口；4—上段隧洞；5—调压井及竖井；6—下段隧洞；7—压力管道；8—封闭式地面厂房；9—巴克溪；10—下水库

枢纽布置 枢纽工程由上水库、下水库、水道系统、厂房等组成，见图。

上水库 位于小巴克溪（Little Back Creek），大坝为黏土心墙土石坝，最大坝高 146m，坝顶长 670m。设有自溃式非常溢洪道，宽 79m，高 3m。上水库正常蓄水位 1012.00m，总库容 4380 万 m^3，日调节水位最大变幅达 32m。

下水库 位于巴克溪。大坝为黏土心墙堆石坝，最大坝高 56m，坝顶长 690m。溢洪道设 2 孔，每孔净宽 9.7m、高 9.14m，最大泄洪能力 1700m^3/s。坝下设有底孔，泄水能力 8.5m^3/s。正常蓄水位 645.70m，发电低水位 627.40m，相应库容 3764 万 m^3，调节库容 2775 万 m^3。正常蓄水位以上留有防洪库容 310 万 m^3。上、下水库之间引水距离 2.5km，可利用水头 327～390m。

水道系统 3 条压力引水隧洞，直径 8.7m，长 1085～1115m，经竖井接下引水隧洞段长 972～1109m。每个竖井上游侧设调压室，直径 13.4m，高 106m。3 条压力引水隧洞的末端分岔为 6 条压力管道，管道直径 5.4m，长 262～268m，用钢板衬砌，钢板厚 25～50mm。

厂房 封闭式地面厂房长 150m、宽 45m、高 61m，安装 6 台单机容量为 350MW 的可逆式抽水蓄能机组。水泵水轮机的转轮直径 6.35m，转速 257.1r/min，吸出水头 −25m。水轮机工况：额定水头为 329m 时，出力为 380MW，流量为 130m^3/s，更新改造后单机最大容量达 462MW。水泵工况：额定扬程为 335m 时，抽水流量为 116m^3/s。发电电动机额定容量 389MV·A，功率因数 0.9，电压 20.5kV，频率 60Hz。厂房顶设 3 组单相变压器组，每组容量为 900MV·A。每两台机组接入一组单相变压器组。

工程施工和造价 工程于 1977 年开工，1985 年第一台机组发电，其余全部机组于 1986 年投运。2004 年开始对机组进行更新改造。1977 年开工时估价，包括考虑施工期利息和物价上涨部分共计为 7.85 亿美元。1985 年建成时总造价达 16.5 亿美元，单位投资 786 美元/kW。

Baxi shuineng ziyuan

巴西水能资源 (hydropower resources of Brasil)

根据英国《国际水电与大坝》杂志 2011 年发布的《World Atlas》统计，巴西水能资源理论蕴藏量 22 800 亿 kW·h/a，技术可开发量约为 12 531 亿 kW·h/a，经济可开发量为 7635 亿 kW·h/a。

巴西的地形主要分为两大部分，一部分是海拔 500m 以上的巴西高原，分布在巴西的南部；另一部分是海拔 200m 以下的平原，主要分布在北部的亚马孙河流域和东南沿海。全境地形分为亚马孙平原、巴拉圭盆地、巴西高原和圭亚那高原，其中亚马孙平原约占全国面积的 1/3。巴西河网密布，水系众多，雨量丰沛，年平均降水量在 2000～3000mm，河流水势宏大，有亚马孙、巴拉那和圣弗朗西斯科三大水系。巴西水能资源的分布状况是：北部地区主要有亚马孙河和托坎廷斯河，其技术可开发水能资源为 5440 亿 kW·h；东北部地区主要有圣弗朗西斯科河下游，其水能资源为 830 亿 kW·h；东南和中西部地区主要有圣弗朗西斯科上游和巴拉那河上游，其水能资源为 2890 亿 kW·h；南部地区主要有巴拉那河下游和乌拉圭河上游，其水能资源为 2790 亿 kW·h。

1945～1980 年间，巴西工业的发展带动了电力需求的不断增长。1960 年巴西水电装机规模达到 3680MW，在电力系统中的比重达到 80.3%；1970 年水电装机规模达到 8830MW，在电力系统中的比重达到 88.7%；1980 年水电装机规模达到 27 520MW，在电力系统中的比重达到 92.4%，这期间巴西开始在其主要的河流（巴拉那河、圣弗朗西斯科河、亚马孙河）上进行大规模的水电开发，开工建设了世界装机规模第二大的水电站——伊泰普水电站。电站装机容量 14 000MW，多年平均年发电量 900 亿 kW·h。20 世纪 90 年代以来，巴西经济衰退和通货膨胀阻碍了曾一度繁荣的水电市场，水电建设步伐趋缓，许多水电计划被搁置。根据英国《国际水电与大坝》杂志 2011 年发布的《World Atlas》，2010 年巴西水电装机容量 85 000MW，年发电量 4050 亿 kW·h，占技术可开发年发电量的 32%左右。

ba

坝 (dam)

截断河流用以拦蓄或调节水流、抬高水位的挡（壅）水建筑物。坝是利用和控制水流的关键建筑物，它所形成的水库可调节径流、控制下泄洪水，为发电、防洪、灌溉、供水、航运等提供有利条件。有的坝形成的水库库容很小，调节水流的作用甚微，一般用于径流发电、改善航道等。早期筑坝的目标比较单一，现代筑坝多以某项目标为主，兼顾多种综合利用要求。

坝多用混凝土、土石、砌石等材料筑成。建坝要选择适

宜的坝址。坝基应稳固、渗透性低。坝和坝基内一般均设有防渗和排水设施，以减少渗漏，增加坝和坝基的稳定性。坝和坝基的连接应可靠，特别应重视其防渗体的连接。坝的主要部位有坝体、坝顶、上下游坝面、坝基面、坝肩、坝踵、坝趾等（见图1）。坝体是坝的顶面、上下游坝面和坝基面所包围的实体。坝顶是坝的顶部结构，包括路面、防浪墙、栏杆、排水沟、电缆和监测沟、灯柱等。坝基面是坝与坝基的接触面。坝的两岸附近坝基称为坝肩。上游坝面与坝基的交接处称为坝踵。下游坝面与坝基的交接处称为坝趾。坝的长度可用坝顶长代表。坝的高度可用坝高代表。混凝土坝坝高是坝的最低建基面（不包括局部深槽、井或洞）至坝的顶面的高差。土石坝坝高为从防渗体（不含坝基防渗设施）底部或坝轴线部位的建基面至坝顶（不含防浪墙）的高度中的较大者。

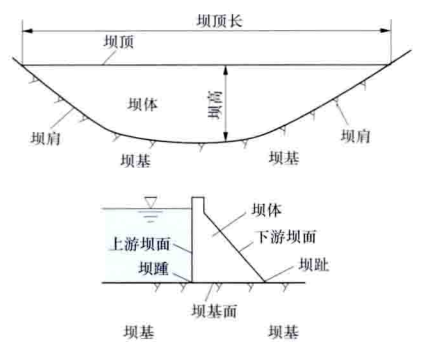


图1　坝的组成示意图

类型　包括：①按筑坝的主要材料分，有混凝土坝、砌石坝、土石坝等。②按结构和力学特点分，混凝土坝和砌石坝有重力坝（包括宽缝重力坝和空腹重力坝）、拱坝（包括空腹拱坝）、支墩坝（包括大头坝、平板坝和连拱坝）。按力学特点，土石坝属重力式，即借坝体自重抵抗库水压力的推力作用。③按泄水条件分，有可泄水的坝和非泄水的坝。混凝土坝和砌石坝可建成可泄水的坝（包括溢流坝、有坝身泄水孔的坝）或非泄水的坝。土石坝多为非泄水的坝。可泄水的土石坝（包括坝顶泄水、坝下埋管泄水）多用于小型或临时性工程。④按施工方法分，对于混凝土坝，有常规方法浇筑的混凝土坝、碾压混凝土坝、预制混凝土构件装配而成的坝；对于土石坝，有碾压坝、水力冲填坝、水中填土坝、定向爆破坝等。采用最多的土石坝为碾压式堆石坝。碾压式土石坝有均质坝、土质防渗体分区坝、非土质材料防渗体分区坝3种。⑤按坝高分，有低坝、中坝和高坝。中国水电站大坝中，混凝土坝坝高50m以下为低坝、50～100m为中坝、100m以上为高坝，土石坝坝高30m以下为低坝、30～100m为中坝、100m以上为高坝。⑥按坝的位置分，当坝截断河谷和地形垭口时，截断河谷的坝称拦河坝或主坝，截断垭口的坝称副坝。有的拦河坝向一岸或两岸延伸很长，将向岸边延伸的这部分坝体称为岸边副坝。重力坝、拱坝、支墩坝、土石坝典型剖面见图2。

设计　主要步骤和内容包括：①充分掌握水文、气象、泥沙、地形、地质等基本资料，查明坝址和库区的工程地质和水文地质条件。②正确选定坝址、坝线和坝型。③确定坝顶高程。根据规划选定的正常蓄水位等各种特征水位和规范规定的洪水标准以及枢纽中的泄水建筑物规模，确定设计洪水位和校核洪水位。为了保证坝顶不漫水并有一定安全裕度，一般在正常蓄水位、设计洪水位、校核洪水位三者之上分别加相应标准的波浪高度（或爬高）及坝顶安全超高，取其最

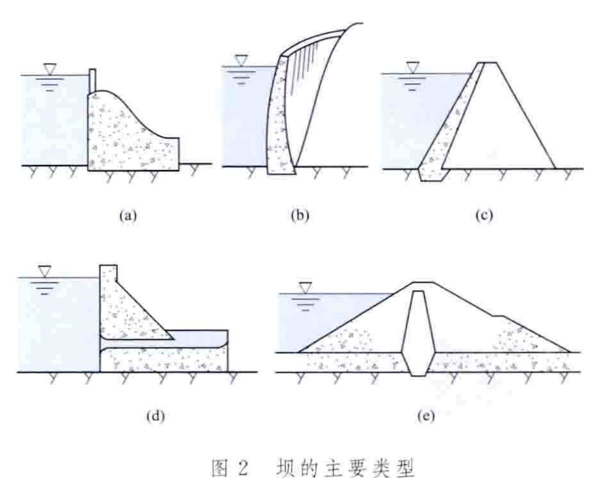


图2　坝的主要类型

(a) 重力坝（溢流坝）；(b) 拱坝（非泄水的坝）；(c) 支墩坝（非泄水的坝）；(d) 重力坝（有坝身泄水孔的坝）；(e) 土石坝（非泄水的坝）

高者确定为坝顶高程。④进行坝的平面和剖面布置。⑤确定作用于坝的荷载。主要有坝体及坝上永久设备自重、水压力、扬压力（渗透压力、浮托力）、波浪压力、冰压力、淤沙压力、土压力，以及温度荷载、地震荷载等，分析荷载组合。⑥进行坝的结构设计。安全系数设计方法要求坝体在各种可能的荷载组合下具有足够的强度和稳定安全性。分项系数极限状态设计方法考虑结构安全级别、设计状况、作用（荷载）和材料性能的变异性，以及计算模型的不确定性等与目标可靠指标相联系的分项系数，要求结构抗力大于结构作用。⑦进行坝基设计，对坝基中存在的地质缺陷进行必要的处理。⑧进行水力计算和泄洪消能设计。⑨根据计算分析成果对坝的布置和体型加以优化。⑩进行坝的原型观测设计并提出监测要求。

施工　见常态混凝土坝施工、碾压混凝土坝施工和土石坝施工。

简史及发展趋势　人类很早就利用土、石等材料修建土石坝及重力坝。埃及尼罗河上的考赛施（Kosheish）干砌石坝遗迹据考证修建于公元前2900年，坝高15m，坝顶长240m。公元3世纪，位于今法国的鲍姆（Borm）砌石圆筒拱坝建成，坝高12m。16世纪，西班牙修建埃尔赫（Elche）砌石连拱坝。公元前250年左右，中国四川岷江都江堰工程使用了竹笼填石的溢流坝。公元初开始用石灰浆砌石修筑砌石重力坝。

19世纪以前，人们一直按经验用土、石及石灰等材料筑坝，常遭水流冲毁。19世纪以后，开始用混凝土筑坝。1853年，法国工程师S. 萨兹里（S. Sazilly）提出了分析重力坝结构的原理。1861～1866年，法国用新法设计建成了坝高52m的佛兰斯（Furens）重力坝，设计中考虑了扬压力的作用，保证了坝的安全。

20世纪初期，钢筋混凝土支墩坝得到较快的发展。30年代有了较完善的拱坝设计理论。40年代以后土石坝的设计理论日趋完善。1916年美国建成了坝高106m的箭石（Arrow Rock）混凝土重力坝，在坝内近上游面设置了排水管和横向伸缩缝，在坝基内设灌浆帷幕及幕后排水孔以减小坝基渗透压力，防止坝体开裂，使重力坝的构造日趋完善。20世纪30年代，美国建成了坝高221.4m的胡佛（Hoover）混凝土拱形重力坝，见图3。1945年建成的高183.5m的美



图 3 胡佛混凝土拱形重力坝

国沙斯塔（Shasta）重力坝，创造和积累了一整套混凝土坝设计、施工的实践经验。世界上最高的重力坝是瑞士于1962年建成的大狄克逊（Grand Dixence）坝，坝高285m。20世纪50年代中叶以后，法国、意大利、葡萄牙、西班牙、瑞士、日本、苏联等国修建了很多拱坝，其中双曲薄拱坝发展较快。世界上最高的拱坝是中国2012年建成的小湾拱坝，坝高294.5m。最高的支墩坝是加拿大1968年建成的丹尼尔·约翰逊（Daniel Johnson）连拱坝，坝高214m。60年代以后土石坝建设进入现代发展阶段。最高的土石坝是塔吉克斯坦1980年建成的努列克（Nurek）坝，坝高300m。截至2012年，已建成51座200m及以上的高坝（见表1）。

表 1 世界上已建成的 200m 及以上高坝统计

序号	坝　名	所属国家	坝高(m)	坝型	建成年份
1	努列克（Nurek）	塔吉克斯坦	300	土石坝	1980
2	小　湾	中　国	294.5	拱　坝	2012
3	大狄克逊（Grand Dixence）	瑞　士	285	重力坝	1962
4	英古里（Inguri）	格鲁吉亚	271.5	拱　坝	1980
5	博鲁卡（Boruca）	哥斯达黎加	267	土　坝	1990
6	瓦依昂（Vajont）	意大利	262	拱　坝	1961
7	糯扎渡	中　国	261.5	土心墙堆石坝	2012
8	奇科阿森（Chicoasen）	墨西哥	261	土心墙堆石坝	1981
9	特里（Tehri）	印　度	260.5	黏土斜心墙堆石坝	1990
10	莫瓦桑（Mauvoisin）	瑞　士	250.5	拱　坝	1991（加高）
11	拉西瓦	中　国	250	拱　坝	2010
12	瓜维奥（Guavio）	哥伦比亚	247	土石坝	1992
13	德里内尔（Deriner）	土耳其	247	拱　坝	2004
14	萨扬-舒申斯克（Sayano-Shushensk）	俄罗斯	245	重力拱坝	1987
15	麦卡（Mica）	加拿大	244	斜心墙堆石坝	1972
16	阿尔伯托·里拉斯（Alberto Lleras）	哥伦比亚	243	堆石坝	1989
17	二　滩	中　国	240	拱　坝	1999
18	奇沃尔（Chivor）	哥伦比亚	237	斜心墙堆石坝	1975
19	吉申（Kishau）	印　度	236	重力坝	1995
20	奥洛维尔（Oroville）	美　国	234	斜心墙堆石坝	1967
21	埃尔卡洪（El Cajon）	洪都拉斯	234	拱　坝	1985
22	水布垭	中　国	233	混凝土面板堆石坝	2009
23	奇尔克伊（Chirkey）	俄罗斯	232.5	拱　坝	1977
24	构皮滩	中　国	232.5	拱　坝	2011
25	卡伦Ⅳ（Karun Ⅳ）	伊　朗	230	拱　坝	2010
26	巴克拉（Bhakra）	印　度	226	重力坝	1963
27	卢佐内（Luzzone）	瑞　士	225	拱　坝	1963
28	胡佛（Hoover）	美　国	221.4	拱形重力坝	1935
29	姆拉丁其（Mratinje）	南斯拉夫	220	拱　坝	1976
30	孔特拉（Contra）	瑞　士	220	拱　坝	1965
31	德沃夏克（Dworshak）	美　国	219	重力坝	1974
32	龙　滩	中　国	216.5	碾压混凝土重力坝	2010（一期192m）
33	格伦峡（Glen Canyon）	美　国	216.4	拱　坝	1966
34	托克托古尔（Toktogul）	吉尔吉斯斯坦	215	重力坝	1978
35	丹尼尔·约翰逊（Daniel Johnson）	加拿大	214	连拱坝	1968
36	凯班（Keban）	土耳其	210	土心墙堆石坝、重力坝	1975
37	埃尔梅内克（Ermenek）	土耳其	210	拱　坝	2007
38	锡马潘（Zimapan）	墨西哥	207	拱　坝	1994
39	伊拉佩（Irape）	巴　西	205	堆石坝	2006
40	巴贡（Bakun）	马来西亚	205	面板堆石坝	2009
41	卡伦Ⅲ（Karun Ⅲ）	伊　朗	205	拱　坝	2005
42	拉克瓦（Lakhwar）	印　度	204	重力坝	1996
43	迪兹（Dez）	伊　朗	203	拱　坝	1962
44	猪溪-1（Hog Creek Site 1）	美　国	202	土　坝	1977
45	阿尔门德拉（Almendra）	西班牙	202	拱　坝	1971
46	坎普斯诺沃斯（Campos Novos）	巴　西	202	面板堆石坝	2006
47	伯克（Berke）	土耳其	201	拱　坝	1996
48	光　照	中　国	200.5	碾压混凝土重力坝	2010
49	卡伦Ⅰ（Karun Ⅰ）	伊　朗	200	拱　坝	1976
50	圣罗克（San Roque）	菲律宾	200	黏土心墙堆石坝	2003
51	科尔布赖恩（Kolbrein）	奥地利	200	拱　坝	1977

1949年以后，中国的坝工建设得到了大的发展。1954年和1956年相继建成坝高74.4m的佛子岭连拱坝和坝高88.2m的梅山连拱坝。1960年和1961年建成4座坝高100m以上的高坝（三门峡重力坝坝高106m，新安江宽缝重力坝坝高105m，新丰江大头坝坝高105m，柘溪大头坝坝高104m，见图4）。中国境内已建成坝高100m以上的坝130座，其中重力坝33座，最高的龙滩碾压混凝土重力坝216.5m（一期192m），光照碾压混凝土重力坝200.5m；拱坝28座，最高的是小湾拱坝，294.5m；土石坝62座，最高的糯扎渡土心墙堆石坝261.5m、水布垭混凝土面板堆石坝233m；支墩坝3座，最高的是湖南镇梯形支墩坝，129m，见图5；砌石坝4座，最高的是宝泉砌石重力坝，坝高107.5m（见表2）。

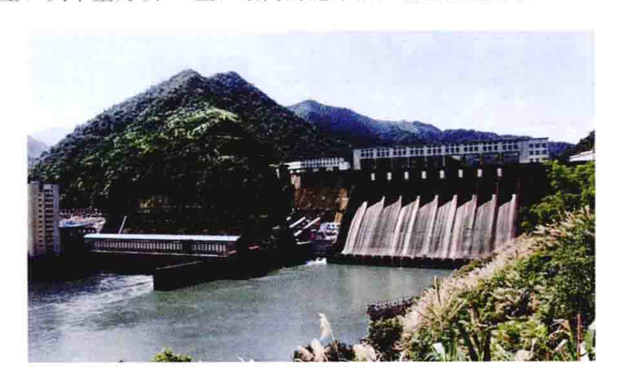


图4　柘溪水电站大坝



图5　湖南镇梯形坝

表2　中国已建成的100m及以上大坝统计

序号	工程名称	所在省区	坝高（m）	坝型	建成年份
1	小湾	云南	294.5	抛物线双曲拱坝	2012
2	糯扎渡	云南	261.5	砾石土心墙堆石坝	2012
3	拉西瓦	青海	250	对数螺旋线双曲拱坝	2010
4	二滩	四川	240	抛物线双曲拱坝	1999
5	水布垭	湖北	233	混凝土面板堆石坝	2009
6	构皮滩	贵州	232.5	重力拱坝	2013
7	龙滩	广西	216.5	碾压混凝土重力坝	2010（一期192m）
8	光照	贵州	200.5	碾压混凝土重力坝	2010
9	三板溪	贵州	186	混凝土面板堆石坝	2006
10	瀑布沟	四川	186	砾石土心墙堆石坝	2009
11	三峡	湖北	181	重力坝	2010
12	德基	台湾	181	双曲拱坝	1974
13	洪家渡	贵州	179.5	混凝土面板堆石坝	2006
14	龙羊峡	青海	178	重力拱坝	1989
15	天生桥一级	贵州、广西	178	混凝土面板堆石坝	2000
16	官地	四川	168	碾压混凝土重力坝	2012
17	万家口子	云南	167.5	碾压混凝土拱坝	2011
18	乌江渡	贵州	165	重力拱坝	1983
19	东风	贵州	162	双曲拱坝	1995
20	滩坑	浙江	161	混凝土面板堆石坝	2008
21	金安桥	云南	160	碾压混凝土重力坝	2010
22	小浪底	河南	160	壤土斜心墙堆石坝	2001
23	东江	湖南	157	双曲拱坝	1992
24	吉林台一级	新疆	157	混凝土面板堆石坝	2006

序号	工程名称	所在省区	坝高（m）	坝型	建成年份
25	紫坪铺	四川	156	混凝土面板堆石坝	2006
26	李家峡	青海	155	三心圆双曲拱坝	1997
27	巴山	重庆	155	混凝土面板堆石坝	2010
28	马鹿塘二期	云南	154	混凝土面板堆石坝	2010
29	隔河岩	湖北	151	三心圆重力拱坝	1995
30	孔梁	重庆	150	重力坝	2005
31	察汗都寺	青海	150	堆积土石坝	1966
32	白山	吉林	149.5	三心圆重力拱坝	1986
33	刘家峡	甘肃	147	重力坝	1974
34	龙首二级	甘肃	146.5	混凝土面板堆石坝	2006
35	瓦屋山	四川	140	混凝土面板堆石坝	2007
36	江口	重庆	140	椭圆双曲拱坝	2003
37	乌鲁瓦提	新疆	138	混凝土面板堆石坝	2001
38	曾文	台湾	136.5	黏土心墙堆石坝	1973
39	九甸峡	甘肃	136.5	混凝土面板堆石坝	2008
40	狮子坪	四川	136	碎石土心墙堆石坝	2007
41	洞坪	湖北	134	拱坝	2006
42	石门	台湾	133	碾压心墙土坝	1964
43	珊溪	浙江	132.5	混凝土面板堆石坝	2001
44	公伯峡	青海	132.2	混凝土面板堆石坝	2006
45	漫湾	云南	132	重力坝	1995
46	宝珠寺	四川	132	重力坝	2000
47	沙牌	四川	132	碾压混凝土拱坝	2002
48	江垭	湖南	131	碾压混凝土重力坝	2000
49	黑河金盆	陕西	130	黏土心墙砂砾石坝	2002
50	百色	广西	130	碾压混凝土重力坝	2006

续表

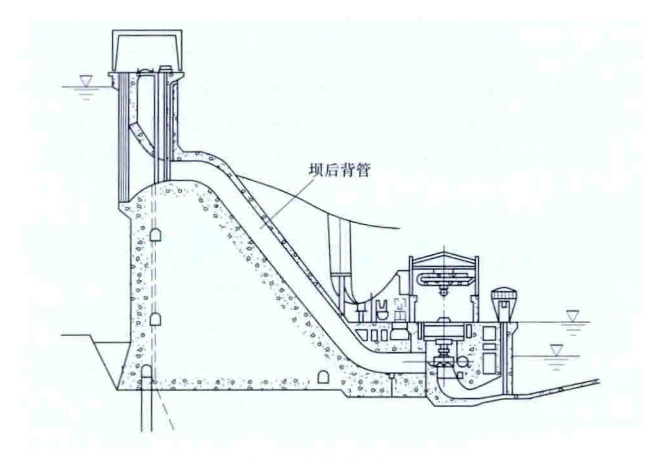
序号	工程名称	所在省区	坝高(m)	坝型	建成年份	序号	工程名称	所在省区	坝高(m)	坝型	建成年份
51	引子渡	贵州	129.5	混凝土面板堆石坝	2003	91	双沟	吉林	110.5	混凝土面板堆石坝	2010
52	湖南镇	浙江	129	梯形支墩坝	1979	92	那兰	云南	109	混凝土面板堆石坝	2005
53	安康	陕西	128	重力坝	1995	93	牛头山	福建	108	混凝土双曲拱坝	2005
54	红旗岗	浙江	128	土石坝	1970	94	景洪	云南	108	碾压混凝土重力坝	2008
55	街面	福建	126	混凝土面板堆石坝	2006	95	潘家口	河北	107.5	宽缝重力坝	1980
56	冶勒	四川	126	沥青混凝土心墙堆石坝	2006	96	宝泉	河南	107.5	砌石重力坝	2007
57	周公宅	浙江	125.5	双曲拱坝	2006	97	黄龙滩	湖北	107	重力坝	1978
58	故县	河南	125	宽缝重力坝	1995	98	高岛东坝	香港	107	沥青心墙堆石坝	1979
59	白溪	浙江	124.4	混凝土面板堆石坝	2001	99	招徕河	湖北	107	碾压混凝土拱坝	2005
60	黑泉	青海	124	混凝土面板堆石坝	2001	100	天花板	云南	107	碾压混凝土拱坝	2011
61	武都	四川	123	碾压混凝土重力坝	2009	101	三门峡	河南	106	重力坝	1960
62	翡翠	台湾	122.5	双曲拱坝	1987	102	水丰	辽宁	106	重力坝	1943
63	塘湖	浙江	122	土石坝	1960	103	茄子山	云南	106	混凝土面板堆石坝	1999
64	索风营	贵州	121.81	碾压混凝土重力坝	2005	104	鱼跳	重庆	106	混凝土面板堆石坝	2002
65	镜坑源	浙江	120.87	土石坝	1978	105	碧口	甘肃	105.3	土心墙堆石坝	1978
66	芹山	福建	120	混凝土面板堆石坝	2001	106	新安江	浙江	105	宽缝重力坝	1960
67	白云	湖南	120	面板堆石坝	2001	107	新丰江	广东	105	大头坝	1977
68	古洞口	湖北	118	混凝土面板砂砾石坝	1999	108	万家寨	山西	105	重力坝	2000
69	藤子沟	重庆	117	椭圆双曲拱坝	2006	109	洞巴	广西	105	混凝土面板堆石坝	2007
70	丹江口	湖北	117/97	混凝土宽缝重力坝	2012/1973	110	鲤鱼塘	重庆	105	混凝土面板堆石坝	2005
						111	柘溪	湖南	104	大头坝	1966
71	思林	贵州	117	碾压混凝土重力坝	2010	112	华光潭二级	浙江	104	拱坝	2005
72	芭蕉河	湖北	115	混凝土面板堆石坝	2006	113	三峡茅坪溪副坝	湖北	104	沥青心墙堆石坝	2007
73	泗南江	云南	115	混凝土面板堆石坝	2007						
74	雾社	台湾	114.6	重力拱坝	1959	114	鲁布革	云南	103.8	土心墙堆石坝	1990
75	文朝	浙江	114.46	土石坝	1966	115	群英	河南	103.5	砌石重力拱坝	1971
76	石头河	陕西	114	心墙土坝	1982	116	思安江	广西	103.4	混凝土面板堆石坝	2004
77	水牛家	四川	114	碎石土心墙堆石坝	2006	117	柴石滩	云南	103	混凝土面板堆石坝	2000
78	云峰	吉林	113.75	宽缝重力坝	1965	118	高岛西坝	香港	102.5	沥青心墙堆石坝	1979
79	彭水	贵州	113.5	碾压混凝土重力坝	2008	119	盘石头	河南	102.2	混凝土面板堆石坝	2006
80	戈兰滩	云南	113	碾压混凝土重力坝	2008	120	紧水滩	浙江	102	三心双曲拱坝	1989
81	凤滩	湖南	112.5	空腹重力拱坝	1987	121	水口	福建	101	重力坝	1996
82	高塘	广东	111.3	混凝土面板堆石坝	2000	122	白水坑	浙江	101	混凝土面板堆石坝	2004
83	大朝山	云南	111	碾压混凝土重力坝	2002	123	下会坑	江西	101	砌石重力拱坝	2002
84	棉花滩	福建	111	碾压混凝土重力坝	2001	124	沙沱	贵州	101	碾压混凝土重力坝	2010
85	恰甫其海	新疆	111	黏土心墙堆石坝	2007	125	盐津桥	贵州	100	砌石重力拱坝	2003
86	苗家坝	甘肃	111	混凝土面板堆石坝	2011	126	云鹏	云南	100	黏土心墙堆石坝	2007
87	岩滩	广西	110	碾压混凝土坝	1995	127	蔺河口	陕西	100	碾压混凝土拱坝	2004
88	石门子	新疆	110	碾压混凝土拱坝	2002	128	塘仙	广西	100	爆破堆石坝	2003
89	上殿畈	浙江	110	土石坝	2006	129	玉龙岩	湖南	100	重力坝	1997
90	长塘坞	浙江	110	土石坝	1957	130	积石峡	青海	100	混凝土面板堆石坝	2010

19 世纪 60 年代以来，世界上建成的坝高 30m 以上的坝中，重力坝最多，约占 45%，其次是土石坝、拱坝和支墩坝。20 世纪 60 年代以后，高土石坝的比重不断增加，高拱坝得到迅速发展，特别是由于大型施工机械和振动碾的采用，出现了混凝土面板堆石坝和碾压混凝土坝两种新坝型，也促进了土心墙堆石坝，尤其是高土心墙堆石坝的进一步发展。中国已建成糯扎渡砾石土心墙堆石坝、水布垭混凝土面板堆石坝，即将建成长河坝、猴子岩、江坪河等混凝土面板堆石坝，这些坝的高度均超过 200m。

bahou beiguan

坝后背管

(penstock on downstream dam face)　上部平斜段埋设于混凝土坝内，下斜管段敷设在混凝土坝下游坡面的压力钢管。坝外钢管段多设钢筋混凝土外包层，如图所示。坝后背管较坝内埋管可简化大坝混凝土施工，减少施工干扰，加快施工进度。背管基本不削弱坝体断面，受力较为明确，但抗撞击能力较差，受温度变化影响较大。坝后背管对大型混凝土重力坝和拱坝中管道直径相对较大的工程最为适用。



坝后背管布置图

由于坝内钢管段水头较低，因此多不设弹性垫层。有钢筋混凝土外包层的坝外钢管段，内水压力由钢管和混凝土外包层中的钢筋共同承担，允许外包混凝土中产生不大于 0.3mm 的径向分散裂缝（短期荷载组合）。外界温度变化引起的应力，由外包层中的环向钢筋承担。自重等荷载引起的轴向应力由混凝土、纵向钢筋和钢管管壁共同承担。混凝土外包层与下游坝面之间的切向应力，由沿坝面设置的梯形榫接缝和锚固于坝内的锚筋承担。坝后背管外包混凝土厚度一般以 1～2m 为宜。无混凝土外包层的坝外管各种荷载作用均由钢管承担。

坝后背管最早于 20 世纪 60 年代应用于苏联建成的克拉斯诺雅尔斯克（Krasnoyarsk）水电站混凝土重力坝（坝高 124m，钢管直径 7.5m，设计水头 130m），其后在萨扬-舒申斯克（Sayano Shushensk）水电站重力拱坝（坝高 245m，钢管直径 7.5m）等大型水电站工程中应用。巴西伊泰普（Itaipu）水电站双支墩大头坝（坝高 196m，钢管直径 10.5m），中国东江水电站拱坝（坝高 157m，钢管管径 5.2m）、龙开口水电站重力坝（坝高 116m，钢管管径 10.0m）、长江三峡工程重力坝（坝高 181m，钢管直径 12.4m）等也都采用了坝后背管。

bahoushi changfang

坝后式厂房

(power house at dam toe)　位于拦河坝非溢流坝段下游坝趾附近的地面厂房。多适用于混凝土坝或混合坝枢纽（见图 1 和图 2）。坝后式厂房引水管路短，采用单机单管供水，闸门设在进水口，厂内一般不设进水阀。

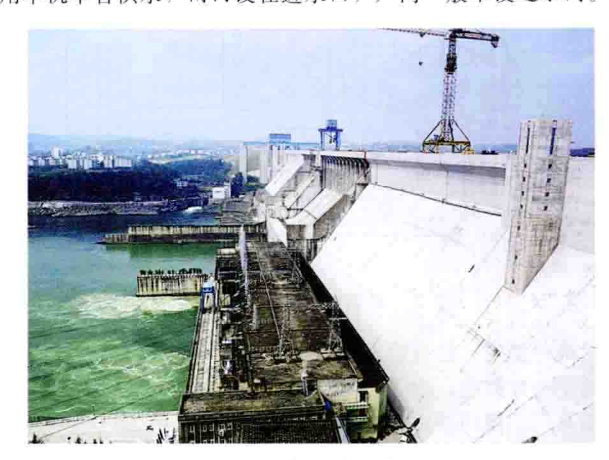


图 1　坝后式厂房

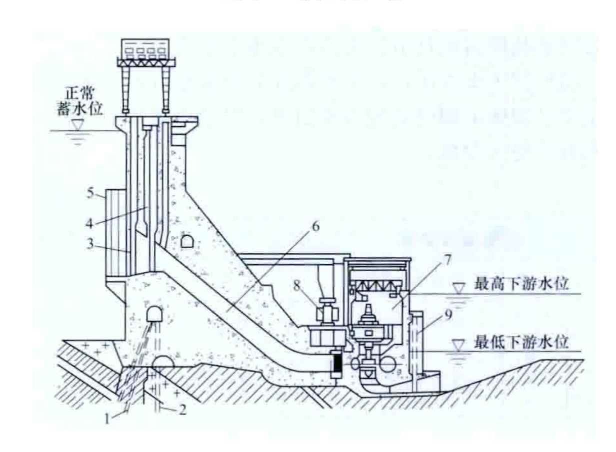


图 2　坝后式厂房剖面图

1—灌浆帷幕；2—排水孔；3—检修闸门门槽；4—工作闸门门槽；5—拦污栅；6—压力管道；7—主厂房；8—主变压器；9—尾水闸门门槽

厂房内常见机组型式为混流式或轴流式，重力坝坝后主厂房通常平行于坝轴线呈一字形布置，拱坝或重力拱坝的坝后式厂房，有的在平面上布置成弧形或斜一字形。电站尾水渠与溢流坝下游水流衔接段之间用导墙隔开，避免泄洪时干扰水电站尾水渠水流。坝后式厂房上部与坝体之间的空间较大，一般可用来布置主变压器、开关站和上游副厂房。此外，尾水管扩散段的上部、尾水平台、进厂交通线近旁及厂房屋顶等部位也可布置副厂房、主变压器、开关站等。中国长江三峡水利枢纽有 26 台机组采用典型的坝后式厂房。

有的水电站坝后式厂房将机组分成前后双排布置，以缩短厂房长度，称双排机组坝后式厂房（见图 3）。中国李家峡水电站采用双排机布置，单机容量为 400MW。

厂房与坝之间的连接，视坝和厂房的结构受力特点等确定。

(1) 对于混凝土重力坝，厂房一般紧靠坝趾，厂、坝之间设有变形缝，互不传递荷载，坝体和厂房各自依靠自身的

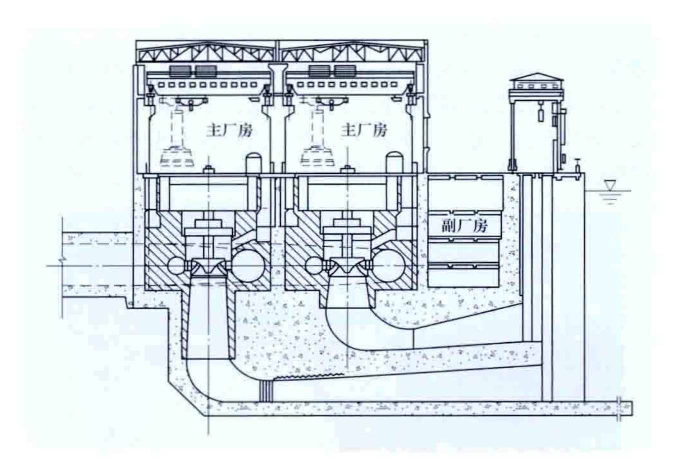


图 3　双排机组坝后式厂房

重量维持稳定。也有的水电站，因下游洪水位较高，或者坝基地质条件较差，为了节约工程量，采取厂、坝联合受力，以提高厂、坝的整体稳定性。

（2）对于拱坝或重力拱坝，有的如同重力坝，厂房紧靠坝趾，有的将厂房向下游移一定距离，以避免厂房基础深开挖对坝基及坝肩的抗滑稳定性产生不利影响。

（3）对于土石坝，厂房多靠近下游坝趾布置，压力钢管设在穿过坝体下部的混凝土廊道中，以避免坝体不均匀沉陷的影响并便于检修。

baji

坝基　（dam foundation）　坝体的地基。包括河床和两岸放置坝体的部位及其邻近承受坝体及水体等作用力的范围。坝基承受的荷载有坝基自重、邻近水体重、淤沙的重力、渗透压力、浮托力、地震力和由坝体传来的各种作用力（坝体自重、水压力、淤沙压力、波浪压力等）。对各种可能的荷载组合作用，坝基均需满足下列基本要求：①有足够的强度和刚度，能承受坝体传来的力，不产生不允许的应力和变形；②有足够的整体性和均匀性，满足坝基抗滑稳定要求；③有足够的抗渗性，满足渗透稳定性要求；④有足够的抗震稳定性，在地震等动力作用下坝基岩土不产生滑动、沉陷、液化等现象；⑤有足够的耐久性，坝基岩土性能在水的长期作用下不恶化。

当坝基承载能力不足、抗滑或渗透稳定性和完整性较差时，应对坝基岩土进行处理，使其达到上述要求（见坝基处理、岩基处理、软基处理）。

坝基可分为岩质、非岩质和非均质 3 种。另外，在地质条件复杂的坝址常遇复杂坝基。

岩质坝基　可分为坚硬岩坝基、中硬岩坝基和软质岩坝基。一般坝基岩石单轴饱和抗压强度大于 60MPa 为坚硬岩坝基，30～60MPa 为中硬岩坝基，小于 30MPa 为软质岩坝基。坚硬岩坝基、中硬岩坝基和软质岩坝基又均可按岩性分为不同类型，见表。同类岩性的坝基还有风化程度、岩体结构（块状、碎裂、层状）以及受地质构造破坏程度的不同。

岩质坝基按岩性分类表

坝基岩石类型			代表岩石	一般特征
坚硬岩坝基	岩浆岩坝基	深成岩坝基	花岗岩、闪长岩、正长岩、辉长岩、橄榄岩等	块状结构，强度高，抗水性好，岩质坚硬
		浅成岩坝基	花岗斑岩、正长斑岩、闪长玢岩、辉绿玢岩	块状结构，强度较高，抗水性较好，岩质较坚硬
		喷发岩坝基	流纹岩、安山岩、粗面岩、辉绿岩、玄武岩	块状或层状结构，常有气孔和岩浆冷却形成的节理，一般强度及抗水性均较好
	沉积岩坝基	沉积碎屑岩坝基	砂岩、粉砂岩、砾岩	层状结构，因胶结物成分不同强度变化很大，抗水性较好
		火山碎屑岩坝基	集块岩、火山角砾岩、熔凝灰岩	块状或层状结构，强度中等到较高，抗水性较好
		化学岩及生物化学岩坝基	灰岩、白云岩	多为层状结构，强度中等到较高，抗水性差，常有溶蚀
	变质岩坝基	深变质岩坝基	片麻岩、结晶片岩	块状及片状结构，强度高，抗水性好
		浅变质岩坝基	石英岩、板岩、片岩	块状及片状结构，强度较高，抗水性好
		热力变质岩坝基	大理岩、硅质灰岩	块状或层状结构，强度较高，溶蚀性弱
软岩坝基	泥质岩坝基		页岩、泥质胶结的砂岩、黏土岩、泥灰岩	层状结构，强度低，遇水易软化
	变质岩坝基		千枚岩、云母片岩、绿泥石片岩	层状结构，强度低，遇水易软化
	火山碎屑岩坝基		凝灰岩、凝灰质页岩	强度低，遇水易软化

非岩质坝基　分为砂砾石坝基、砂质坝基和土质坝基，级配良好的砂砾石坝基具有较高的承载能力，可作高土石坝及坝高 40 余米以下的混凝土坝的坝基。砂质坝基抗管涌能力弱，承载能力和沉陷性能因颗粒组成、级配、密实度等的不同有很大的变化。均匀的中细砂层遇地震容易液化。土质坝基防渗性能好，内摩擦系数小，沉陷过程长。土质坝基种类繁多，性能相差很大，因颗粒组成、生成条件等而异，主要有黏土坝基、壤土坝基、黄土坝基等。其中黄土属大孔隙土，含大量水溶盐，遇水丧失强度，产生大量沉陷，由于其成因复杂，湿陷性有显著差异；而淤泥密度小，沉陷量大，都需仔细研究和处理。

非均质坝基　不挖除河床覆盖层的岩质坝基、岩性不均一的坝基、具有多种沉积物的非岩质坝基均属此类，其变形、强度、渗透等性能往往不均匀，需要在坝和坝基的设计中妥善处理。

复杂坝基　有重大地质问题，需要进行复杂处理的坝

基。复杂坝基包括有缓倾角软弱夹层的坝基、深覆盖层坝基、有深槽的坝基、喀斯特发育的坝基、有大的断裂构造的坝基等。

（1）有缓倾角软弱夹层的坝基。坝基岩体中夹有曾受地质构造破坏、相对软弱的薄岩层，其力学强度低，遇水易软化或泥化，连续性好，倾角小于30°。这种软弱夹层对坝基稳定最为不利。软弱夹层埋藏于地下，其分布和性状不易查清，需根据勘探资料和地质背景、生成条件等加以综合分析判定。影响软弱夹层抗剪强度的因素主要有夹层中的软弱物质的性状、界面的状态（糙度、起伏度）等。根据所夹物质的不同，软弱夹层可分为黏泥型、泥含粉粒碎屑型、碎屑夹泥型、碎屑型等类型，一般含泥多的界面光滑，起伏度小的软弱夹层抗剪强度最低。

（2）深覆盖层坝基。有的坝基覆盖层深度超过百米，著名的有巴基斯坦塔贝拉（Tarbela）坝基、加拿大马尼克3（Manic 3）坝基，中国冶勒坝基覆盖层最深达420m。这种坝基多修建土石坝和低的混凝土坝，需采取复杂的防渗措施。

（3）有深槽的坝基。坝基岩体中有窄而深的槽，充填砂砾石等软弱物质，多见火山喷发岩坝基，需要清除或处理。例如，中国铜街子水电站玄武岩坝基中有深达70余米的深槽，龙开口水电站玄武岩坝基以下有深30余米、宽7～22m的深槽，沿上、下游斜穿坝基。有的工程坝址有顺河向陡倾宽断层，采用开挖置换一定厚度的钢筋混凝土基础，基础下一定深度的垂直防渗措施。

（4）喀斯特发育的坝基。喀斯特主要发育在灰岩中，查清其分布规律一般需进行大量的勘探工作。防渗处理不好，可能大量漏水。中国乌江渡重力拱坝，坝高165m，两岸喀斯特及暗河发育，坝肩附近洞穴回填混凝土总体积达8万多立方米，左岸部分地段沿断层发育的溶洞深达河床以下200m，用高压灌浆等措施进行大量复杂的处理，取得成功。

（5）有大的断裂构造的坝基。例如，河床和岸坡有顺河断层、横河及斜交断层，甚至活动性断层，对坝基的稳定、变形、防渗等都有极大影响，需予以规避或采取谨慎的工程措施。

baji chuli

坝基处理

（treatment of dam foundation）　通过人工方法提高大坝岩土基础强度、整体性、抗渗性、抗震能力和耐久性的工程措施。其目的是：①使坝基抗滑稳定、变形、承载能力、渗透稳定和渗漏量满足设计要求；②使坝基岩土性能在水的作用下长期保持整体性、均匀性，满足耐久性要求；③使坝基岩土在地震动力作用下不产生滑动、沉陷、液化等现象。

根据坝基的不同类型，坝基处理分为岩质坝基处理、非岩质坝基处理。岩质坝基处理也包含岩性不均一的非均质坝基处理和有重大地质问题，包括有软弱夹层或断层破碎带、深槽、喀斯特发育等的复杂坝基处理。非岩质坝基处理包括砂砾石坝基处理、砂质和土质坝基处理，也包含具有多种沉积物的非均质坝基处理，以及湿陷性黄土、易液化土、软黏土或淤泥透镜体等复杂坝基处理。

坝基处理要求和方法见岩基处理、软基处理。

baji wending

坝基稳定

（stability of dam foundation）　坝基在各种荷载作用下具有足够的强度、整体性和均匀性，满足抗滑稳定、变形稳定、渗透稳定、抗震稳定和耐久性等的能力。对多数坝基，抗滑稳定尤为重要。坝基稳定是保证坝的安全和正常运行的基本条件。

抗滑稳定　分为岩质坝基抗滑稳定和非岩质坝基抗滑稳定两种类型。

岩质坝基抗滑稳定　岩质坝基滑动失稳多是由于坝基岩体中存在产状不利、抗剪强度较低、比较连续的结构面，特别是软弱夹层最为不利。在各种荷载作用下，坝基岩体沿不利结构面及岩体抗剪能力最低的路径在临空面出露，形成滑动边界。当滑动边界上的滑动力大于阻滑力时，坝基即滑动失稳。滑动边界一般由滑动面、切割面、临空面和下游阻滑面组成（见图1）。滑动面多为埋藏不深、连续性强、倾角小于30°的软弱结构面。它是控制坝基滑动稳定的主要因素。切割面有上游切割面和侧切割面，多由横河和顺河发育的陡倾断裂面构成。临空面是滑动岩体出露的地表面，有时滑动岩体下游存在压缩性很大的陡倾断层，也常被视为临空面。滑动面倾向下游，滑动时能起支撑作用的岩体为下游抗力体。抗力体的底面为下游阻滑面。

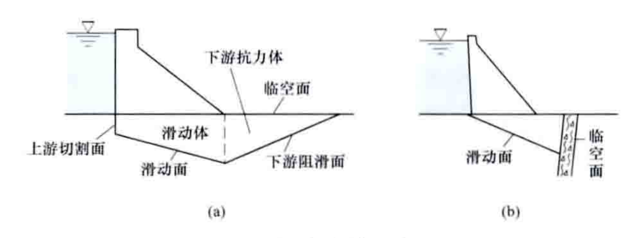


图1　滑动边界示意图

（a）折面滑动；（b）有压缩性大的临空面的滑动

滑动失稳的形式可分为深层滑动、浅层滑动和混合型滑动3种。坝基深层存在缓倾角软弱结构面时，滑动失稳是岩体沿深部滑动面滑动破坏，具有单面滑动（见图2）、双面滑动［见图1（a）］和多面滑动（见图4）等形式。浅层滑动失稳是由于浅层岩体软弱、风化层未彻底挖除，沿坝基浅部滑动。混合型滑动失稳是部分沿坝体或坝体与岩体接触面滑动，部分在岩体内部滑动（见图3）。

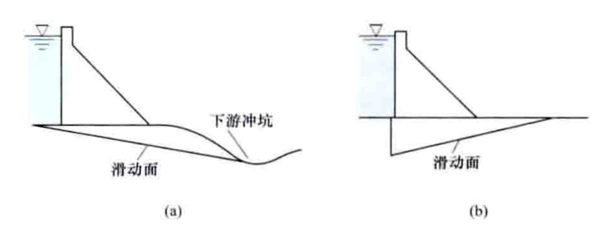


图2　单面滑动示意图

（a）滑动面倾向下游；（b）滑动面倾向上游

岩质坝基的抗滑稳定分析，首先根据勘测、试验资料，并参考类似工程经验，经分析判断找出可能的滑动边界，合理确定滑动边界上的抗剪参数（摩擦系数 f 和凝聚力 c）。在此基础上进行分析计算或模型试验，以判定坝基的抗滑稳定性。分析计算方法可采用刚体极限平衡法或有限元法。地

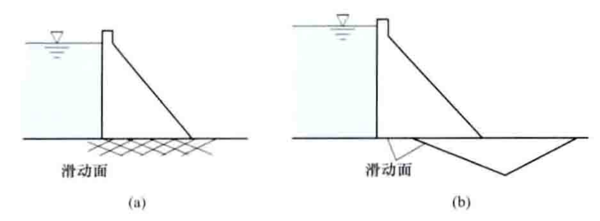


图 3　浅层滑动和混合型滑动示意图
(a) 浅层滑动；(b) 混合型滑动

质条件复杂的重要工程可用地质力学模型试验验证。刚体极限平衡法将滑动边界内岩体视为刚体，只考虑它所受合力的平衡，而不考虑力矩和变形作用。中国设计规范以刚体极限平衡法为主要计算方法（见重力坝、拱座稳定），并规定相应的抗剪参数取值和安全系数标准。深层滑动可根据地质结构形态分析确定控制性滑动面，进行极限状态抗滑稳定分析。双面滑动为最常见的情况，在分项系数极限状态设计法中，坝基深层双面滑动抗滑稳定计算采用主动滑体与被动滑体的安全度相等的等安全系数法。

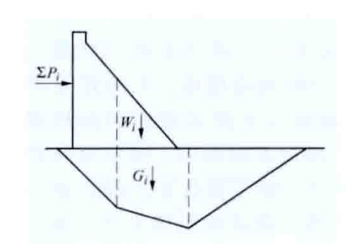


图 4　坝基多滑面示意图
ΣP_i—水压力；W_i—混凝土坝重力；G_i—基岩重力

非岩质坝基抗滑稳定　除坝基内存在沿特定的抗滑软弱面外，滑动多沿抗滑能力最弱的滑弧发生。分析计算方法一般采用刚体极限平衡法。无抗滑软弱面时可采用圆弧法，存在软弱面时采用折线法。

变形稳定　过大的或很不均匀的变形可导致坝基变形失稳。在岩质坝基中多由于存在大的断层破碎带，在非岩质坝基中多由于有压缩性大的土层。在荷载作用下，坝基变形与荷载呈线性关系时，坝基一般处于稳定状态。

渗透稳定　渗流可导致管涌和流土，使坝基渗透失稳。在非岩质坝基中，管涌是土的细小颗粒被渗流冲走，形成管状渗流通道，甚至掏空部分坝基的现象。流土是坝基部分土体被渗流抬动，使坝基丧失承载能力的现象。在岩质坝基中，断裂构造中的软弱物质被渗流冲刷可能导致管涌。管涌容易在不均匀系数大的非黏性土中发生。当渗流的水力坡降大于土体的管涌临界水力坡降时即产生管涌。管涌临界水力坡降多由试验确定。防止管涌破坏，除降低渗流的水力坡降外，主要靠做好渗流出口处的反滤。流土多发生在颗粒级配均匀和颗粒较细的砂性土中，但若设计、施工不当，黏性土中有时也发生流土。产生流土的条件是土体渗透性小，排水不畅，水力坡降较大，渗透压力超过土体重量。

抗震稳定　丧失抗震稳定主要有两种情况：①坝基受地震作用孔隙水压力增大，有效压力减小，抗滑强度降低，使坝基滑动失稳。坝基中黏性土或黏性土夹层含水量高、排水不畅时容易发生这种情况。②地震时坝基土体液化，使坝基完全丧失强度。一般颗粒较细、级配均匀的疏松砂土容易产生液化。中值粒径为 0.02～0.5mm、不均匀系数为 2～10、黏粒含量小于 17%、塑性指数小于 14 的土属于液化土。灵敏度高的黏性土及淤泥也容易产生液化。

耐久性　为防止坝基渗流对岩土内部的冲刷、化学溶蚀和淤塞，以及侵蚀性地下水对坝基处理措施（如防渗墙、帷幕灌浆、固结灌浆等）长期效果的影响，要求坝基及其处理措施具有足够的耐久性。

banei maiguan

坝内埋管

（penstock buried in dam）　埋设于混凝土坝体内的压力钢管。钢管与坝体混凝土间可设或不设压缩垫层。管内最大流速一般为 5～7m/s。多见于混凝土重力坝或重力拱坝的坝后式厂房、溢流式厂房和坝内式厂房布置中。

布置形式　剖面布置形式有倾斜式、平式（或平斜式）和竖直式 3 种。倾斜式布置如图 1（a）所示，管轴线与坝下游坡面近似平行，特点是：①进水口高程较高，大部分管段内水压力较小；②管轴线和坝体内较大的主应力轨迹线近于平行，管道外围混凝土孔口应力较小；③进口闸门启门力小，闸门及启闭设备的造价较低，运行较方便；④弯道较多，管道较长。平式（或平斜式）布置如图 1（b）所示，其管道较短、弯道较少、水头损失小，但由于进口高程较低，坝体孔口受力较差，施工时干扰也大，进水口、闸门及启闭设备投资大，运行不够方便。此种布置多用于混凝土拱坝或较低的重力坝。竖直式布置通常适用于坝内式厂房，如图 1（c）所示。

坝内埋管的平面位置位于坝段中央，管径不大于坝段宽度的 1/3～1/2。平面布置有斜向和直向两种形式。当大坝与厂房的横缝处于同一位置时，坝内埋管在平面上需斜向布置进入厂房，如图 2（a）所示。直向布置的坝内埋管从坝段中央进入厂房，大坝与厂房的横缝不在同一位置上，而是相互错开的，大坝与厂房间设纵向缝，如图 2（b）所示。

结构计算　包括钢管结构计算及其周围钢筋混凝土结构

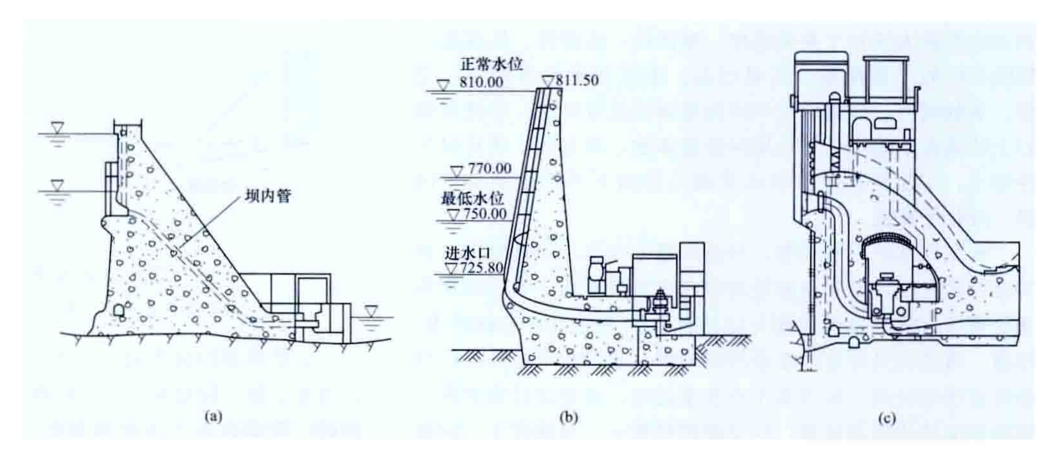


图 1　坝内埋管的剖面布置形式
(a) 倾斜式布置；(b) 平式（或平斜式）布置；(c) 竖直式布置

计算。钢管与混凝土间设压缩垫层时，钢管承担全部内水压力，可按明管结构设计，其允许应力可适当提高，但不得超过1.1倍。钢管周围混凝土按大坝孔口应力配筋。钢管与混凝土间不设压缩垫层而浇筑在一起时，按钢管、钢筋和混凝土共同承受内水压力设计，不允许外围混凝土出现贯穿性裂缝，钢管周围混凝土按承受部分内水压力的孔口应力配筋，并需做好接触灌浆，保证钢管与外围混凝土接触密实。钢管计算包括：①内水压力作用下的钢板厚度计算；②外水压力，以及施工期浇筑混凝土及灌浆等外压分别作用下的钢管抗外压稳定计算。

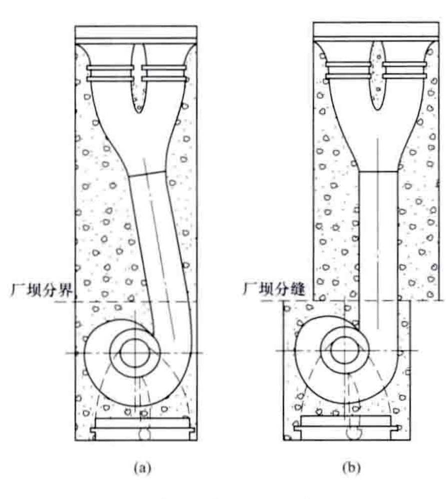
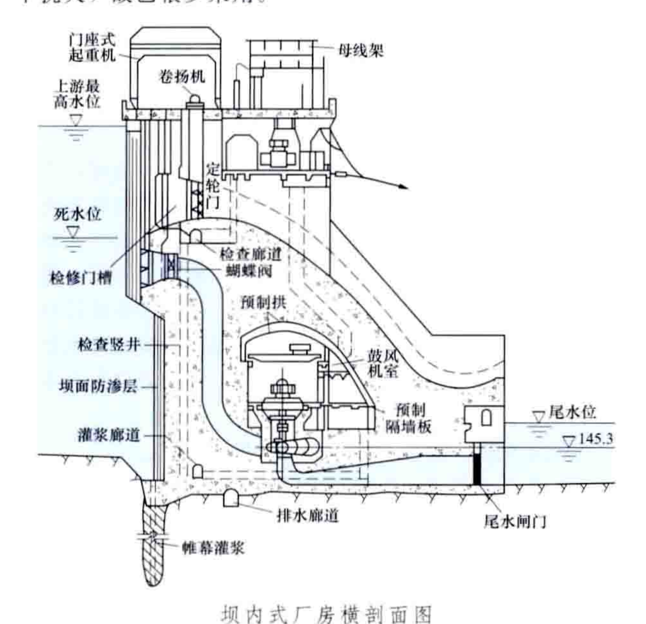


图2 坝内埋管的平面布置形式
(a) 斜向布置；(b) 直向布置

baneishi changfang

坝内式厂房

（power house within dam） 设在混凝土坝空腔内的水电站厂房。当河谷狭窄，下泄洪水流量大时，坝内式厂房布置紧凑，有时是可采用的方案（见图）。20世纪50年代建成的上犹江水电站厂房是中国最早的坝内式厂房。受坝体内空腔高度和形状尺寸的限制，厂房布置适应性较差，全封闭的厂房运行条件差，厂房与大坝施工相互干扰大，故已很少采用。



坝内式厂房横剖面图

坝内式厂房常设于溢流坝坝段内，机组进水口多设在溢流坝闸墩内，闸墩宽度较大，可避免进水口的拦污栅、检修闸门、工作闸门与溢洪道布置上的干扰，还可将机组进水口设在溢洪道下面，上下重叠，但进水口闸门布置较复杂。当厂房布置在非溢流坝坝体内时，其机组进水口布置类似坝后式厂房。

压力管道埋置在坝体中，长度较短，水头损失小。尾水管水平段需穿过坝体后腿，为使后腿的孔洞周围应力不超过允许限度，尾水管水平段断面宜采用窄高型。尾水管出口位于溢流坝挑流鼻坎下，或非溢流坝下游坝趾处，设有尾水闸门和启闭机械。

主变压器场和开关站可因地制宜布置，有的利用其他坝段空腔，有的设在坝顶。

ba qian nisha yuji

坝前泥沙淤积

（sediment deposition at dam） 在河流上筑坝壅水后，由于壅水区内水深加大，流速降低，泥沙沿程淤积，并向坝前推进，造成枢纽水工建筑物前的淤积。坝前泥沙淤积产生的问题主要有：①在船闸引航道中及其口门附近产生淤积，使航深不足或水流不顺而有碍通航；②电站进水口前的泥沙堆积使过机水流中的泥沙变粗，含沙量增大，造成过水建筑物或水轮机过流部件的严重磨损；③坝前泥沙淤积有可能影响闸门启闭，堵塞泄水孔，影响大坝安全；④坝前泥沙淤积增加大坝受力，影响大坝安全。

以通航为主的枢纽和以发电为主的枢纽对坝前水流条件的要求不同，防治坝前泥沙淤积的措施也不同。

（1）以通航为主的枢纽。宜将船闸布置在靠近稳定深泓线一侧，要避开弯道的凸岸和回流、缓流区。这些地区都是泥沙集中淤积处，且淤积后又难以冲走。结合各个工程的实际情况，可设置某些导流排沙工程，如修建引航导墙以破除回流，减少淤积；设置底板高程较低的冲沙闸，以定期冲刷上游及下游引航道淤沙。

（2）以发电为主的枢纽。高水头水电站的防沙措施主要是设置高程较低的排沙洞（孔）。排沙洞（孔）布置在机组进水口的下面，防沙效果最好，但结构复杂，施工及管理都不方便。一般把排沙洞（孔）设在进水口的侧下方，其位置布设以使进水口处在冲刷漏斗的影响范围之内为原则。低水头枢纽的防沙措施，主要是进行合理的平面布置，并设置必要的导沙、排沙设施。如利用弯道环流特性，正面取水，侧面排沙，同时设置导沙坎；在顺直河段取水可采用“正向泄洪、排沙，侧向取水”的布置，同时设置冲沙闸、束水墙、拦沙坎，常能取得较好的防沙效果。

bashen xieshuikong

坝身泄水孔

（outlet in dam body） 通过混凝土坝或砌石坝坝身孔口过流的泄水建筑物。一般由控制段、过流段和消能建筑物组成，见图1。按所在高程的不同，可分为表孔、中孔和深孔（底孔），表孔由坝面溢流（见溢流坝）；中孔和深孔在枢纽工程中的作用与泄洪隧洞相似，在

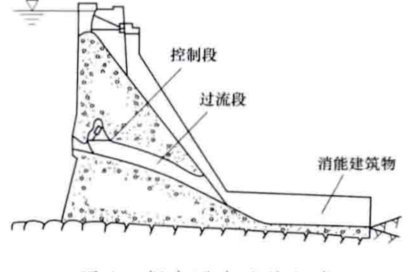


图1 坝身泄水孔的组成

水库高、低水位时均能泄水，有利于水库排沙和防止发电厂房取水口前泥沙淤积，并在紧急情况下用来放空水库。汛期可参与泄洪，有的还参与施工后期导流及承担导流洞下闸封堵蓄水初期向下游泄放生态流量。

按水力学条件，坝身泄水孔可分为有压和无压两种。有压泄水孔的控制段布置在坝下游出口处，设有工作闸门以控制水流，检修闸门布置在上游进口。这种泄水孔的轴线在平面上可不要求为直线，但洞内流速和弯道曲率不宜过大。无压泄水孔的控制段布置在坝体上游侧，闸后为无压水流，孔口内水面以上应留有净空并设通气孔补气，线路尽量顺直，以维持流态稳定。

坝身泄水孔在坝体内开孔，削弱了坝体结构，当孔内为压力水流时，孔壁还将承受内水压力。在坝体应力、内水压力及温度应力的作用下，孔口边缘将出现应力集中现象，需在孔口周边配置钢筋予以加强，或用钢板镶护；对有压孔口，宜采用圆形断面，以改善孔口应力条件。

坝身泄水孔可以采用底流水跃消能，也可采用挑流消能，其挑流鼻坎可采用和溢流表孔鼻坎不同的高程和挑角，以便使水舌在空中相互碰撞消能，减轻河床冲刷。当溢流表孔采用消力池消能时，可使坝身泄水孔的挑流水体落入消力池内形成挑流与底流相结合的消能方式。坝身泄水孔的消能建筑物布置见图 2。

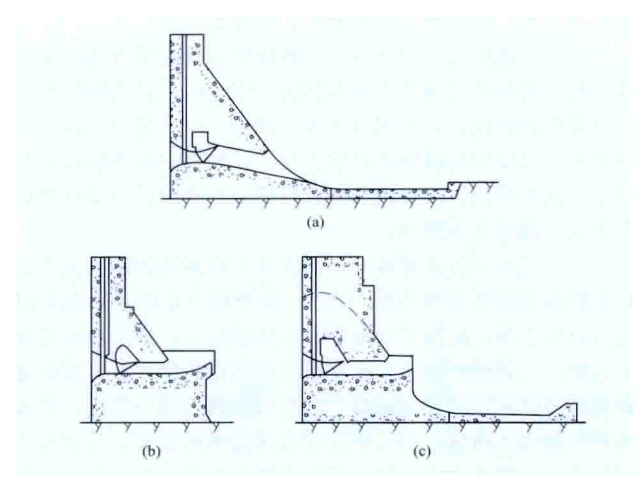


图 2　坝身泄水孔的消能建筑物布置
(a) 底流消能；(b) 挑流消能；(c) 挑流与底流相结合消能

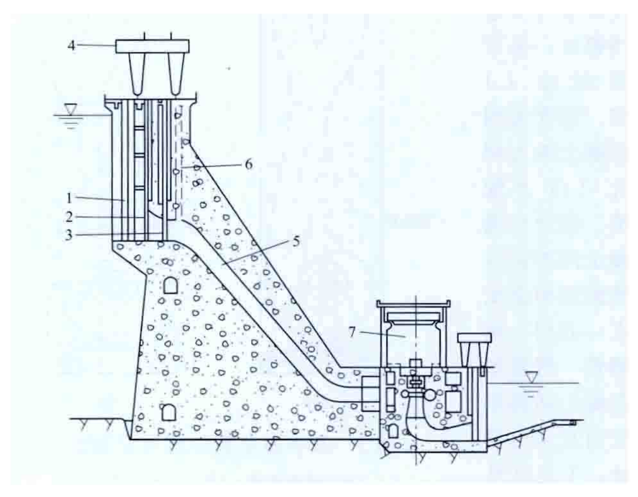
bashi jinshuikou

坝式进水口

（intake integrated with dam）　在混凝土坝或压力前池上布置的水电站进水口。由拦污栅、检修闸门、工作闸门及坝顶门座式起重机组成。为便于布置闸门和拦污栅，一般在坝前向上游伸出悬臂牛腿和墩墙。进水口可设检修闸门和事故闸门（快速闸门）。拦污栅设在喇叭口上游端，可布置成一孔一栅，也可布置成通仓拦污栅。大型水电站为满足过栅流速要求，一般布置成通仓拦污栅，这样既可增大过流面积，又可在拦污栅被局部堵塞时不影响各进水口的引水。

拦污栅及闸门一般由设在坝顶的门座式起重机操作。为保证在动水中下门的要求，事故闸门（快速闸门）由专设的液压启闭机操作。

坝式进水口利用坝体进行布置，不必专设进水塔。在坝体上设置进水口虽对坝体应力分布和大坝施工有一定影响，但由于布置紧凑、经济合理、方便运行操作，因此坝后式厂房优先选用这一形式，如中国长江三峡水电站，见图。



坝式进水口剖面图
1—拦污栅；2—检修闸门；3—工作闸门（事故闸门或快速闸门）；4—坝顶门座式起重机；5—压力管道；6—通气孔；7—坝后式厂房

bashi shuidianzhan

坝式水电站

（dam type hydropower station）　由河道上的挡水建筑物壅高水位而集中发电水头的水电站。坝式水电站由挡水建筑物、泄水建筑物、引水系统、厂房及机电设备等组成。由坝作挡水建筑物时多为中高水头水电站。由闸作挡水建筑物时多为低水头水电站。当水头不高且河道较宽阔时，可用厂房作为挡水建筑物的一部分，这类水电站又称河床式水电站，也属坝式水电站。

坝式水电站和引水式水电站是水电开发的两种基本方式。坝式水电站适宜建在河道坡降较缓的河段。由挡水建筑物形成的水库可调节径流，其调节能力取决于调节库容与入库径流比值的大小（见径流调节）。有的坝式水电站水库容积较大，具有多年调节和年调节的能力，也有的坝式水电站水库容积很小，只能进行日调节甚至不能调节径流。不调节径流的水电站称为径流式水电站。

坝式水电站的特点有：①具有日调节以上性能时，适宜担任电力系统的调峰、调频和备用任务，可增大电站在电力系统中的电力效益和提高供电质量；②枢纽布置集中，便于运行管理；③库区河道水深增加，有利于通航；④不会像引水式水电站那样要出现减（脱）水河段；⑤调节性能较好的水电站，库水位变幅较大，在水轮机选择时要兼顾机组稳定运行要求和低水头时机组出力受阻问题；⑥需处理好水库淹没损失和移民问题。

坝式水电站厂房按与坝的相对位置可分为：

（1）坝后式厂房。厂房在坝后，压力管道通过坝体，如中国的刘家峡水电站。

（2）坝内式厂房。压力管道和厂房都在坝内，如中国的凤滩水电站。

（3）溢流式厂房。厂房在溢流坝后，泄洪水流从厂房顶部越过，也有利用厂房顶作为泄洪道的底坎的，如厂坝连接采用下部结构完全脱开、厂房顶板为钢筋混凝土拉板简支在

坝体的新安江水电站。

(4) 岸边式厂房。厂房设在下游岸边，引水道在坝侧地下，如中国的白山水电站（二期）。

(5) 地下式厂房。引水道和厂房都在坝侧地下，如中国的二滩水电站。

(6) 河床式厂房。厂房本身是挡水建筑物的一部分，如中国的大化水电站。

baxian

坝线 (dam axis) 坝顶上游边线或中心线，也称坝轴线。它是坝位置的基准线，可作为布设勘探网点、进行枢纽布置设计的参考线，以及施工放样的基准线。各类混凝土坝多以坝顶上游边线为坝线，土石坝则以坝顶中心线为坝线。坝线可为直线、折线或曲线。坝线位置要尽量使枢纽主要建筑物避开坝址内的重大地质缺陷，布置在地质、地形条件适于建坝和其他主要水工建筑物的部位。枢纽布置，地形、地质条件和工程投资是坝线选择的重要因素。单薄山脊对坝肩防渗不利，一般不宜作为高坝的坝线位置。河湾地段形成的河间地块，对布置土石坝枢纽的泄洪、导流建筑物有利，当地质条件允许时，可作为土石坝枢纽的坝线位置。峡谷、丘陵区坝址的泄洪、导流及地下建筑物的布置条件也是选择坝线位置的重要因素。在平原坝址，使水电枢纽总体工程量最小常是重要因素。一般在选定的坝址内，通过对几条可能坝线的技术经济综合比较确定坝线。

baxing

坝型 (dam type) 坝的类型，按坝体材料、结构及传力方式、泄洪方式、施工方法、坝的位置等分类。基本坝型主要为混凝土坝、土石坝和砌石坝。坝型选择是水电枢纽工程设计的重要决策项目。采用的坝型是否合理，对工程的质量、安全、经济性以及施工、运行等均有很大的影响。不同坝型各有其特点及适用条件。影响坝型选择的因素有坝址的地形、地质、水文、气象、当地建筑材料等自然条件和枢纽布置、导流、对外交通、施工组织、工期、坝的运行条件等。坝型选择一般与坝址、坝线和枢纽布置结合考虑，在多方案的技术经济综合比较的基础上选定。通常坝型选择分阶段进行，先选出基本坝型，进一步深入工作后，再从基本坝型中选出采用的坝型。

混凝土坝　除挡水外，坝体还可用来布置泄洪、引水和导流建筑物，有时还可在坝体内设置发电厂房，因而可充分利用河床布置枢纽建筑物，抗超标准洪水的能力强，有较高的安全性，适用于在宽河谷坝址修溢流坝，在洪水流量大的峡谷坝址也常用作挡水坝或溢流坝。重力坝一般建在岩基上。拱坝较重力坝可节省坝体工程量20%～70%，它要求两岸拱座岩体稳定性好，能够支撑拱坝传来的推力，适用于两岸岩体坚硬、完整的窄峡谷坝址。但拱坝施工较重力坝复杂，有时拱座需要加固处理，要求坝体能承受较高的应力。支墩坝较重力坝可节约30%左右的坝体工程量，但施工复杂，模板工程量大，需要劳动力较多，坝体暴露表面多，在严寒地区容易产生温度裂缝，20世纪80年代以后已较少采用。

土石坝　利用土石材料筑坝，可以节省水泥，减少外来物资的运输量。对坝基工程地质条件要求较低，一般不能利用坝身过水。这种坝型适用于岸边容易布置泄洪、导流及引水发电等建筑物的坝址，以及有合适的土石筑坝材料，外来建筑材料运输费高，近坝库岸无大的滑坡、涌浪威胁等的场合。土石坝中，堆石坝，特别是混凝土面板堆石坝，坝坡较陡，其泄洪、导流、引水等建筑物的长度也相应较短，并可以利用枢纽工程开挖的石料筑坝，施工受雨季和寒冷气候的影响较小，施工速度较快，坝体抗管涌的能力强，是一种经济、安全的坝型。但这类坝型对坝基的要求较高，一般要求坝基岩土的抗剪能力和压缩性能满足稳定和变形的要求。级配良好的砂砾料坝具有与堆石坝类似的优点，坝坡也较陡，可以利用天然砂砾料，对坝基要求较堆石坝低。均质土坝多为较低的坝，坝坡缓，抗管涌能力低，施工常受雨季及低温季节的影响，施工进度较慢。

砌石坝　具有与混凝土坝类似的优点，可节省水泥，但需耗用大量劳动力，多用于中小型水电工程。

bazhi

坝址 (dam site) 在规划利用的河段上可以修建挡（壅）水建筑物（坝）的区段。一般一个坝址包含几条适于布置挡水建筑物的坝线。对坝址的基本要求是既能支承挡水建筑物，又能形成水库。坝址要具备建坝和建库的地质、地形条件，不存在难以解决的工程地质和水文地质问题，同时还应具备有利于枢纽建筑物的布置，便于导流和施工，交通运输便利，天然建筑材料丰富，可形成较大库容，淹没、浸没损失较小等条件。应尽量避免选择存在重大地质问题的坝址；当坝址存在复杂地质问题时，只要查清地质条件，并通过工程处理也可建坝。中国和其他国家都有在复杂地质条件的坝址上建成高坝的先例，见图。中国在喀斯特发育的坝址成功建设了乌江渡、构皮滩等水电站，其中构皮滩水电站坝高超过230m。在预定的河段上选择良好的坝址是水电站工程建设的重要决策步骤之一。



长江三峡工程坝址

类型　可分为峡谷、丘陵区坝址和平原区坝址。

(1) 峡谷、丘陵区坝址。多为岩基坝址，可以修建较高的坝。两岸岩体雄厚、完整的窄峡谷坝址适于建拱坝；宽峡谷坝址可建重力坝或重力坝与土石坝的混合坝；岸边有泄洪条件及河床覆盖层深厚的坝址宜修筑土石坝。有些坝址能适应多种坝型。岩层走向与河流近垂直的坝址称横向谷坝址，倾角较陡时，对坝基及两岸防渗和抗滑稳定有利；当坝址河段内可能出露不同的岩层时，可选择地质条件较优的区段作为坝线。岩层与河流近平行的坝址称纵向谷坝址，它往往对坝基及两岸防渗不利，一般岩层一岸倾坡内，其岸坡稳定性

较好；另一岸倾坡外，其岸坡稳定性较差，且坝址河段内岩层变化小，对地质条件的选择性小。岩层与河流斜交的坝址，称斜向谷坝址，其性质介于上述两类坝址之间。

（2）平原区坝址。多为土基坝址，建坝条件较差，只适宜修建土坝和高度较低的重力坝。

重大地质问题　峡谷、丘陵区坝址常见的重大地质问题有：①缓倾角软弱夹层。它降低了坝基和拱座的抗滑能力，可能引起坝的失稳。②大的断裂构造带。它可能构成坝基及岸坡的滑动边界，引起坝基和拱座的沉陷或压缩变形，产生渗漏及渗透变形等。③岸坡崩塌体、大的卸荷裂隙带、滑坡体等，可能造成岸坡失稳，近坝库岸滑坡可能引起水库涌浪。④河床深覆盖层及古河道，可能引起坝基渗漏和渗透变形、沉陷、抗震稳定性差等问题。⑤喀斯特通道，引起库、坝区严重漏水等。

平原区坝址常存在的地质问题有黄土、软土、粉细砂等不良土层问题和古河道、牛轭湖、决口口门、沙丘等不良水文地质构造问题，可能引起坝基及两岸的沉陷、滑动、渗透变形、抗震稳定性差等问题。

此外，坝址处于强地震区也是坝址的重大地质问题。

坝址选择　选择坝址时需要充分掌握可供比选坝址的基本资料，综合考虑地形、地质、枢纽布置、施工等条件，要特别重视各坝址存在的重大地质问题及处理方案的可靠性和经济性。有时征地移民安置也是选择坝址的因素。一般以各坝址的代表坝线、坝型、枢纽布置及同等深度的设计进行技术经济综合比较，最后根据综合反映投资、工期、工程效益、对环境移民的影响等因素的分析结果，结合技术条件的论证选定坝址。

bazhi gongcheng dizhi kancha

坝址工程地质勘察　(engineering geological investigation for dam site)　为选择坝址和查明坝址工程地质条件所进行的综合调查工作。勘察工作范围应涵盖枢纽区大坝、发电厂房、泄洪洞、输水洞、溢洪道、导流洞等水工建筑物。勘察工作一般分阶段进行，遵循工作深度逐步加深的原则，各阶段勘察任务、内容、方法及提交成果的深度均有相应的技术要求。

勘察任务　包括：①规划阶段。配合规划方案选择和确定建坝河段，调查了解各梯级坝址的工程地质条件和主要工程地质问题，分析建坝条件。②预可行性研究阶段。在规划选定梯级的河段，初步查明坝（闸）址、引水线路、厂址等的工程地质条件，对主要工程地质问题和代表性枢纽布置工程地质条件作出初步评价，推荐代表性坝址。③可行性研究阶段。在预可行性研究勘察的基础上，查明各比较坝址的工程地质条件和主要工程地质问题，对选定坝址各建筑物工程地质条件作出评价，为选定坝型和各建筑物轴线及地基、边坡与洞室围岩处理方案设计提供地质依据和建议。④招标设计阶段。复核和补充查明可行性研究阶段遗留的有关坝址区和永久、临时建筑物工程地质问题，补充作出评价。⑤施工详图阶段。开展施工地质工作，补充论证存在的专门性工程地质问题，为施工详图设计与工程安全鉴定提供地质资料。

勘察内容　包括：①规划阶段。主要是了解建坝河段和坝址区的地形地貌，出露地层和岩性，地质构造类型、规模和性状；岩体的风化、卸荷、松动变形及滑坡、崩塌等物理地质现象和岸坡稳定情况；可溶岩地区岩溶发育情况、透水层与隔水层的分布情况，岩土体渗透性、地下水埋深及水化学特性。对近期工程还需了解坝基中主要软弱夹层的层位、性状和分布情况；主要断层，特别是缓倾角断层的性状及延伸情况，岩体的稳定条件等；坝址区地震动参数、相应地震基本烈度及区域构造稳定性；坝址附近天然建筑材料的种类和储量。②预可行性研究阶段。初步查明坝址河床及两岸覆盖层厚度、成因、组成、分布及透水性，出露地层和岩性及其物理力学性质，尤其是软弱岩层、易溶岩等或夹层分布和性状，各级断裂的分布及其组合，缓倾角断裂的分布规律及性状；河床及两岸岩体风化、卸荷深度及程度；坝基岩体及断裂带的渗透性，相对隔水层埋藏深度，地下水类型、水位及动态，岩溶发育规律，岸坡稳定条件等。进行岩土物理力学性质试验、地震安全性评价及天然建筑材料初查。③可行性研究阶段。查明覆盖层厚度、组成、渗透性、承载力、压缩变形、渗透比降及液化条件等，基岩的各向异性、变形特征及抗剪强度，软弱岩层或夹层的分布及物理力学性质；控制大坝稳定的断层的规模、产状及其空间变化规律，断层带物质的组成、性状、强度和水化学稳定性；岩体风化、卸荷深度及渗透性、岩溶发育深度，地下水埋深、动态、相对隔水层的埋藏条件；大坝下游抗力体及冲刷部位岩体性质、风化程度及完整性，两岸岸坡稳定条件等。上述研究内容可根据坝型及具体地质条件有所侧重。土石坝对地基要求低，重点勘察地基抗渗稳定性、地震液化和防渗土料料源；重力坝、拱坝等对地基地质要求较高，需重点勘察确定建基面及控制坝基、坝肩抗滑稳定的结构面，研究岩体力学性质和混凝土骨料质量。④招标设计阶段。复核有关坝基岩土体工程特性与变形特性、水文地质条件、坝基与边坡的稳定条件、天然建筑材料问题等，提供与枢纽建筑物等设计优化有关的地质资料；查明临时（辅助）建筑物及专门性问题的工程地质条件，作出评价。⑤施工详图阶段。根据坝址开挖揭露的地质条件，核实坝基（坝肩）各部位岩土体的变形、滑动边界条件及计算参数，可利用基岩面的深度、坝基加固及防渗措施等专门地质问题。

勘察方法　主要有：①规划阶段。以综合性工程地质测绘和物探为主，配合坑槽和少量钻探、平洞及室内试验工作。河床覆盖层、岸边岩体风化、堆积体等厚度主要用物探了解。对主要岩、土、地下水和地表水进行鉴定性试验。②预可行性研究阶段。综合运用钻探、物探及坑探等方法，按岩类取样，进行岩石物理力学性质试验。勘察期间应开展地下水动态观测和不稳定岩土体变形观测。③可行性研究阶段。开展详细工程地质测绘，根据坝型、坝高及地质条件，在建筑物范围内进行详细勘探。勘察期间宜结合勘探工作，建立地下水长期观测网和不稳定岩土体的监测点（网）。④招标设计阶段。对专门性工程地质问题的补充勘察，视具体工程地质问题确定相应的勘察方法。⑤施工详图阶段。进行大比例尺施工地质测绘。结合坝基编录，进行岩体弹性波速、点载荷和回弹仪等简易测试。必要时可补充勘探和试验工作。

勘察成果　坝址勘察成果应纳入各阶段工程地质报告。各阶段勘察成果的内容和深度各有不同。

Baishan Shuidianzhan

白山水电站　(Baishan Hydropower Station)　位于中国第二松花江上游、吉林省桦甸市白山镇境内，工程开发

任务以发电为主，兼有防洪、养殖等综合利用效益，是东北电力系统主要调峰、调频和事故备用电源，见图 1。电站装机容量 1800MW，分三期建设。一期工程装机 3 台，装机容量 900MW；二期工程装机 2 台，装机容量 600MW；一、二期多年平均年发电量 20.03 亿 kW·h。三期为抽水蓄能电站，装机 2 台，装机容量 300MW，年平均增加发电量 5.223 亿 kW·h。一期工程电站以 3 回 220kV 出线接入东北电力系统，二期和三期工程电站以 220kV 电压 2 回出线接入东北电力系统。



图 1　白山水电站

水文和水库特性　坝址以上流域面积 1.9 万 km^2，多年平均流量 $239m^3/s$。水库正常蓄水位 413.00m，死水位一期 372.00m、二期 380.00m；总库容 62.15 亿 m^3，为年调节水库。工程按 500 年一遇洪水流量 19 $100m^3/s$ 设计，5000 年一遇洪水流量 26 $200m^3/s$ 校核；最大可能洪水保坝，相应流量 32 $200m^3/s$，库水位 423.45m。

枢纽布置　主要建筑物由大坝、泄水建筑物、厂房及三期抽水蓄能电站等组成，见图 2。

大坝　单曲三心圆重力拱坝，坝顶高程 423.50m，最大坝高 149.5m，坝顶总长 676.5m，顶宽 9～20m。

泄水建筑物　大坝共设 4 个表孔，单孔宽 12m、高 13m，校核洪水时最大泄流量为 $6740m^3/s$。设 3 个深孔，孔口宽 6m 和 12m、高 13m，校核洪水时最大泄流量为 $3996m^3/s$。水垫塘分为一级池和二级池。消能塘宽 94.46m，总长 189m；二级池同时作为三期抽水蓄能电站下水库进水口引渠。

厂房　包括右岸一期地下式厂房和左岸二期岸边式厂房。

地下式厂房尺寸为 121.5m × 25m × 54.25m。厂内安装 3 台竖轴混流式水轮发电机组，单机容量 300MW，水轮机转轮直径 5.5m，额定转速 125r/min。发电机为悬式空冷型，额定电压 18kV，定子铁芯直径 12.3m。3 条引水隧洞长度分别为 287.6、242.8m 和 223.2m。3 条尾水洞长度分别为 250.7、222.3m 和 196.88m。尾水调压井为圆筒式，高 22.1m。

一期主变压器布置在主厂房下游侧洞内。发电机电压侧采用发电机-变压器组单元接线，每一单元均临时连接到尾水平台的 1 台 220kV 少油断路器，直送地区变电站。

左岸二期岸边式厂房长 89.5m，宽 25.5m，高 55.78m。两条发电引水隧洞，直径 8.8m，出口段直径 7.5m。4 号引水洞长 481.80m，5 号引水洞长 488.54m。厂房内装 2 台与一期工程相同的水轮发电机组。

三期抽水蓄能电站　布置于左岸地下，上水库为白山水库，下水库为红石水库。包括下水库进水口引渠、下水库进/出水口、引水洞、地下厂房及附属洞室、尾水洞和上水库进/出水口等建筑物。

下水库进/出水口布置相同，进口段总长 42.0m。引水洞采用两机一洞的布置形式。引水主洞全长 287.5m。引水主洞以 45°的 Y 形分岔分出两条引水支洞，引水支洞平行布置，间距 19.50m。

地下厂房宽 21.7m，主机间长 41.6m、高 50.6m。共装 2 台 150MW 混流可逆式机组。机组额定转速 200r/min。转轮最大直径 5.264m。主变压器室布置在主厂房的下游侧。

工程施工　一期主体工程于 1975 年开工，1983 年第一台机组发电；二期工程，1984 年一期工程结束后接续施工，1992 年发电；三期工程 1999 年开工，2007 年发电。

综合利用　白山水电站处于东北电力系统中部，是第二松花江开发的第一个梯级，它与下游红石、丰满水电站群进行联合调度，提高了全梯级运行效益。在系统运行中起调峰调频和事故备用作用。在防洪方面，起拦洪削峰作用。1986 年的一次洪水，白山水库拦蓄水量 20.2 亿 m^3，使丰满水库入库洪峰由 $6736m^3/s$ 削减为 $5528m^3/s$，削减 21.8%。

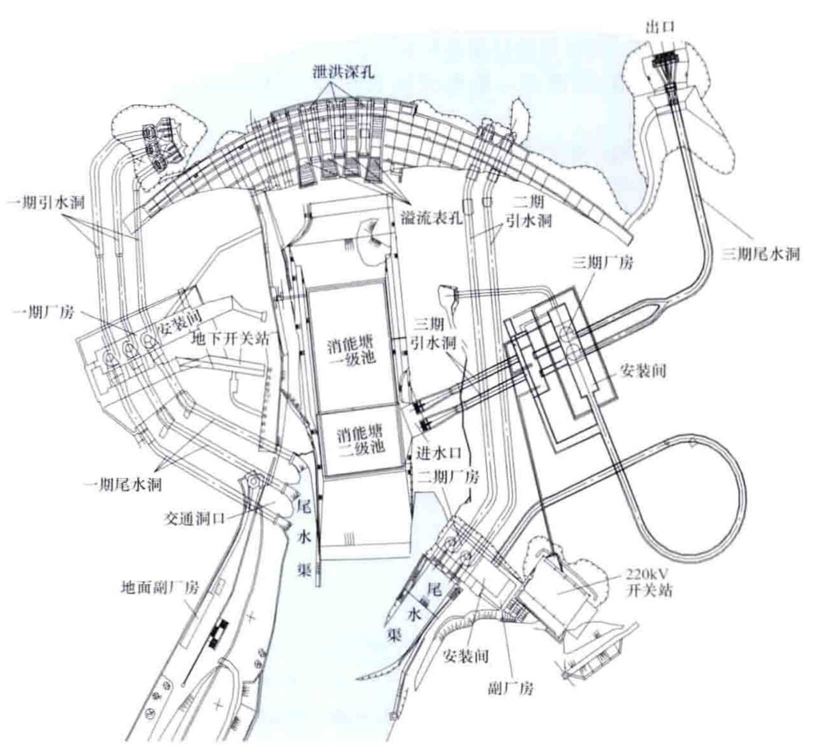


图 2　白山水电站枢纽平面布置图

设计单位 东北勘测设计研究院（现中水东北勘测设计研究有限责任公司）。

baozheng chuli

保证出力 (firm power; guaranteed output)

水电站（群）在相应于设计保证率的供水时段内的平均出力。水电站设计保证率是指水电站运行过程中正常工作不遭破坏的概率，即时段平均出力大于或等于保证出力的概率。

设计保证率有历时保证率和年保证率两种表示法：①历时保证率为水电站正常工作不遭破坏的历时与总运行历时的比值；②年保证率为水电站正常工作不遭破坏的年数与总运行年数的比值。其中，历时保证率较为常用。

设计保证率与可靠性不同，它是以水电站功率为基础。水电站设计保证率的选择是一个复杂的技术经济问题，由于在设计保证率以外（即当保证率大于设计保证率时），会因水电站出力减小而导致电力系统的困难和损失难以估算，故在规划设计中，一般按规范规定选用。DL/T 5015—1996《水利水电工程动能设计规范》规定的水电站设计保证率见表。

中国规定的水电站设计保证率

电力系统中水电容量的比重（%）	25 以下	25～50	50 以上
水电站设计保证率（%）	80～90	90～95	95～98

保证出力是水电站最重要的技术指标之一，也是论证水电站装机容量和水电站效益的基础，在进行水电站规划设计时是按水电站的保证出力进行电力平衡，确定容量效益。水电站保证出力的大小与开发方式、水文特性、水库调节性能和调节方式有关。对于河流梯级开发或跨流域水电站群，则常有水文补偿、梯级径流补偿及跨流域电力补偿调节，提高水电站群保证出力的效益。因此，对梯级电站及同一电力系统中的水电站群，应以与设计保证率相应的水电站群的总保证出力为规划设计的基础，单独水电站的保证出力意义较小。

当出现大于设计保证率的特枯水年或特枯水季时，电力系统的正常运行将受到影响，规划设计中，可考虑动用一半的其他电厂备用容量，以弥补水电站出力的不足。

保证出力不是一个单纯的指标，而应是出力的年过程，即按径流调节以后，将水电站（群）的出力按月（或旬）分别从大到小排列求出各月（或旬）的保证率曲线，然后按设计保证率求出各月（或旬）的相应出力，即为其保证出力过程。这种保证出力过程对各月（或旬）均具有相同的保证率。对于水电比重较大的系统中的控制性水库电站，或综合利用（如供水等）任务有特殊要求时，有可能为控制设计保证率以外时段的破坏深度而适当预留调节库容，这样部分减少了水电站保证出力。

Baoguchang Shuidianzhan

鲍古昌水电站 (Boguchany Hydropower Station)

位于俄罗斯西伯利亚安加拉河中游乌斯特-伊里姆水电站下游375km处。工程除发电外，还有供水功能。电站装机容量2700MW，多年平均年发电量176亿kW·h。以220kV高压、500kV超高压输电线路分别向地区工业和西伯利亚联合电力系统供电。

水文和水库特性 坝址以上流域面积83.1万km^2，多年平均年径流量1070亿m^3。正常蓄水位208.00m，相应库容16.21亿m^3，最高库水位209.50m，为季调节水库。1000年一遇洪水设计，10000年一遇洪水校核。

工程地质条件 坝址区基岩为粗面岩。

枢纽布置 枢纽由大坝、泄水建筑物、厂房等组成，见图。



鲍古昌水电站枢纽布置图

大坝 由土石坝和混凝土重力坝组成，挡水前沿总长2690m。土石坝长1861.3m，最大坝高87m，采用沥青心墙；混凝土重力坝长828.7m，最大坝高96m。

泄水建筑物 第一溢洪道设5个表孔，堰顶高程199.00m。第二溢洪道设3个表孔，结合台阶式坝面，下游均采用消力池消能。正常高水位下泄流量为6327m^3/s。

厂房 坝后式厂房，厂房内安装9台水轮发电机组，单机容量300MW。水轮机为立轴混流式，转轮直径7.5m，转速90.9r/min，最大水头71.0m，最小水头66.1m；设计水头为65.5m时，引用流量为570m^3/s。发电机为伞式，功率因数0.9，电压15.75kV，采用晶闸管静止式励磁。

工程施工 施工期间采用坝身5个临时缺口导流。工程于1979年开始施工准备，1987年截流后因资金问题工程几次停工，2006年复工，2012年底实现3台机组发电。

主要工程量：土方开挖263万m^3，石方开挖927万m^3，土石方回填4024万m^3，混凝土浇筑324万m^3，金属结构安装3.58万t。

baoyu

暴雨 (rainstorm)

强度很大的降雨。暴雨标准世界各地不统一。中国气象部门规定：1h降雨达到或超过16mm，12h达到或超过30mm，24h达到或超过50mm的为暴雨；24h达到或超过100mm的为大暴雨；24h达到或超过200mm的为特大暴雨。暴雨是常见的一种灾害性天气。强度特大和持续性暴雨常引起山洪暴发、河水泛滥和泥石流，造成严重的洪涝灾害，或造成水库、闸坝、堤防等的破坏。但适度的暴雨也是水资源的重要补给来源，可用来兴利。

暴雨的成因 产生暴雨的主要物理条件是充沛的水汽、强盛持久的气流上升运动和不稳定的大气结构。在各种尺度天气系统的相互作用与有利地形的相互配合下，往往产生大暴雨。影响中国暴雨的天气系统主要有锋面、气旋、切变线、低涡、低压槽等西风带低值系统和台风（热带风暴）、

东风波、热带辐合带等低纬度热带天气系统。前者影响中国大部分地区，后者主要影响华南和东南沿海各省。个别深入内陆的台风也能产生特大暴雨。在干旱和半干旱地区，局部地区的热力强对流天气也能产生历时短、范围小、强度特大的雷暴雨。

中国暴雨时空分布　世界各地暴雨时间和空间分布很不均匀。中国暴雨集中在4个时期。4～6月主要出现在南岭以南地区，是华南前汛期暴雨出现的季节。在华南沿海已多次出现24h降雨超过600mm的特大暴雨。6～7月暴雨主要出现在长江淮河流域，是长江中下游梅雨季节，特点是强度较小、持续时间长、分布面广、降雨总量大。1954年6～7月江淮流域出现持久性梅雨锋面暴雨，长江和淮河都出现了几十年来最大的洪水。7～8月是西南和东南季风最活跃的季节，暴雨主要出现在四川西部、华北、东北一带。东南沿海受台风影响，多台风暴雨。台风登陆后也可以影响华北和东北地区。在此季节出现的暴雨，强度较大，分布面也较广。1963年8月上旬停滞在河北省太行山东麓的低气压暴雨，在獐狘站7天降雨2051mm，最大24h降雨达950mm。1975年8月上旬，河南省南部伏牛山东麓出现特大台风暴雨，林庄站8月7日24h降雨达1060mm。1977年8月1日在内蒙古和陕西交界处，毛乌素沙漠边缘地区出现了特大强雷暴雨，乌审旗木多才当10h降雨1400mm（调查值），创中国最高纪录。9月以后，随东北季风暴发，雨区南撤，东南沿海一带仍受台风侵袭和南下冷空气影响，大暴雨仍可能出现。在台湾省北部，1976年11月17日新寮24h降雨1672mm，17～19日3天降雨2749mm，仅次于南印度洋上留尼汪岛锡劳斯的24h雨量1870mm与3日总降雨3240mm，居世界第二位。

参考书目

陶诗言，等．中国之暴雨．北京：科学出版社，1980.

baoyu diaocha

暴雨调查　（storm investigation）　对早期出现过的和近年发生的特大暴雨的调查工作。目的是弥补雨量站网观测资料的不足和延长暴雨资料系列。暴雨调查是水文调查工作中的一项重要内容，对于设计暴雨计算、设计洪水计算及其成果合理性的论证具有重要作用。工程设计中经常采用的年最大暴雨频率等值线图，编制时便采用了暴雨调查资料。

暴雨调查的内容一般包括暴雨量、强度、过程、暴雨中心位置的分布及走向、暴雨笼罩的范围、雨前及当时天气形势、地面天气状况以及灾害情况等。调查方法主要是访问、考察、查勘、测量、向有关单位搜集各种历史文献资料和前人调查记录及分析研究报告。中国对早期出现过的大暴雨，如辽宁西部1930年8月的大暴雨及长江中游1935年7月的特大暴雨进行了大量调查工作，提出分析报告，并绘制了暴雨等值线图。对当年发生的大暴雨及时进行调查，不仅可以弥补现有雨量站实测资料的不足，还可以通过分析、比较，发现和纠正观测资料中的问题，核实数据。1977年陕西、内蒙古交界处罕见的大暴雨，17h中心雨量为平均年降雨量的3倍，经过调查发现暴雨中心雨量站的记录偏小甚多。1975年8月淮河大暴雨经调查后，也订正了279个测站部分有问题的资料。

baozha lixue

爆炸力学　（mechanics of explosion）　研究爆炸的发生和发展规律以及爆炸的力学效应利用和防护的学科，是力学的一个分支。它从力学角度研究化学爆炸、核爆炸、电爆炸、粒子束爆炸（也称辐射爆炸）、高速碰撞等能量突然释放或急剧转化的过程，以及由此产生的强冲击波（又称激波）、高速流动、大变形和破坏、抛掷等效应。爆炸力学是力学、物理学和化学之间的一门交叉学科。

爆炸力学研究的是高功率密度的能量转化过程，大能量通过高速的波动来传递，历时特短，强度特大。爆炸力学的研究常需考虑力学因素和化学、物理因素的耦合，流体特性和固体特性的耦合，载荷和介质的耦合等。多学科的渗透和结合成为爆炸力学发展的必要条件。爆炸现象十分复杂，并不要求对所有因素都进行精确的描述，而抓住主要矛盾进行实验和建立简化模型，特别是运用和发展各种相似律或模型律具有重要意义。爆炸波在介质中的传播以及波所引起的介质的流动、变形、破坏和抛掷现象是爆炸力学研究的中心内容。高温、高压、高应变率条件下，介质的力学性质和本构关系是爆炸力学的重要内容之一。化学爆炸分为爆轰和爆燃两种反应方式。爆轰的反应传播速度远大于声速，速度固定，不受外部条件影响，反应面的密度大于反应前。爆燃是一种迅速燃烧的现象，其反应区向未反应物质中推进的速度小于未反应物质中的声速。爆轰的流体力学理论是波在可反应介质中当化学反应和力学因素强烈耦合时的流体力学理论。气相、液相、固相、混合相介质的稳态和非稳态爆轰，爆燃和爆轰间的转化，起爆机理和爆轰波结构都是爆轰学研究的对象。此外，还有与工程应用直接相联系的工程爆破理论和技术。

在矿业、水利和交通运输工程中，用炸药爆破岩石（爆破工程）是必不可少的传统方法。定向爆破、光面爆破、预裂爆破等控制爆破技术的应用日益广泛。爆炸在机械加工方面也有广泛的应用，如爆炸成型、爆炸焊接、爆炸合成金刚石等。爆炸防护在工业安全方面占有重要地位。井下瓦斯爆炸、天然气爆炸、粉尘爆炸等都是生产上十分关心的问题。爆炸力学在军事科学技术中也起着重要作用。

beiyong rongliang

备用容量　（reserve capacity）　为保证电力系统安全、稳定、可靠、灵活地连续运行而预留的工作容量以外的发电设备容量。按设置的目的可分为负荷备用容量、事故备用容量和检修备用容量，按机组的备用运行状态可分为旋转备用容量与非旋转备用容量。

负荷备用容量　为担负电力系统日内正常负荷的短时波动和计划外负荷增加而增设的发电容量。电力系统的负荷备用容量一般为电力系统最大负荷的2%～5%。频繁起停的用户（如轧钢、电气交通）占比重较大的系统，要求负荷备用容量较大。水电站机组起停快，运行灵活，应多担负系统负荷备用容量，但长引水道及径流式水电站应分别少担负及不担负负荷备用容量。

事故备用容量　为保证在电力系统中发电和输变电设备

发生事故时能够正常供电而增设的装机容量。电力系统机组事故与运行机组台数及其被迫停运率（即事故率，等于机组故障时间除以故障及无故障总时间的商值）有关。水电站被迫停运率远比火电厂小。

设电力系统有 n 台机组，每台机组平均被迫停运率为 p，则 m 台机组同时发生事故的概率 $P(m)_n$ 可用式（1）表达，即

$$P(m)_n=\frac{n!}{m!\,(n-m)!}p^m(1-p)^{n-m} \quad (1)$$

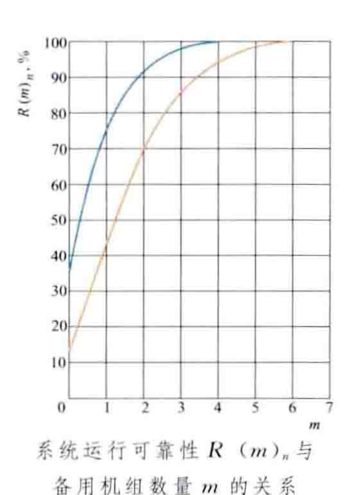
装 m 台机组为备用时，系统运行可靠性 $R(m)_n$ 可用式（2）表达，即

$$R(m)_n=\sum_{m'=0}^{m}P(m')_n \quad (2)$$

当 $n=100$、$p=1\%$ 及 $p=2\%$ 时，m 台机组同时发生事故的概率及装 m 台机组为备用时的系统运行可靠性见表和图。

系统运行可靠性表

m	$P(m)_n$		$R(m)_n$	
	$p=1\%$	$p=2\%$	$p=1\%$	$p=2\%$
0	0.366 0	0.132 6	0.366 0	0.132 6
1	0.370 2	0.271 0	0.736 2	0.403 6
2	0.184 5	0.270 0	0.920 7	0.673 6
3	0.061 0	0.182 5	0.981 7	0.856 1
4	0.014 9	0.090 4	0.996 6	0.946 5
5	0.002 9	0.035 3	0.999 5	0.981 8
6	0.000 0	0.011 4		0.993 2
7	0.000 0	0.003 1		0.996 2
8	0.000 0	0.000 0		



系统运行可靠性 $R(m)_n$ 与备用机组数量 m 的关系曲线（$n=100$）

由表及图可知，在一定的机组数及被迫停运率情况下，系统需要的备用容量随系统运行可靠性要求的增加而增加。但当备用容量达到一定数量时，增加的备用容量，其利用率是很小的，对系统运行可靠性增加值的贡献也是微不足道的。由于电力系统运行可靠性是关系到停电损失的一个复杂的技术经济问题，故系统事故备用容量也是复杂的技术经济问题。

系统规划中，应在技术、经济分析的基础上选择系统可靠性，从而相应确定系统的事故备用容量。同一电力系统，在不同的情况下，可以有不同的事故备用容量值。在缺乏停电经济损失资料时，常按一般经验选用。事故备用容量一般采用系统最大负荷的10%左右，但不得小于系统中最大一台机组的单机容量及最大一回输电线路的输送容量。水电站由于机组起动快、增加容量的造价较低，故宜多担负系统事故备用容量。系统事故备用容量的分配除要进行经济论证外，还要考虑的因素有：①系统事故备用容量不宜过分集中在一个或少数电站；②一个电站所分配的事故备用容量占装机容量的比重不宜过大；③担负事故备用容量的电站宜靠近负荷中心；④水电站担负系统事故备用容量时，应有足够的事故备用库容。

检修备用容量　当电力系统年内低负荷季节的富余容量，以及水电和火电机组丰、枯季互补容量不能满足全部发电机组的周期性计划检修时必须增设的发电容量。

旋转备用容量　电力系统中处于开机旋转待命状态的发电机组最大可能出力与发电负荷之差，也称热备用，可在短时间内带满负荷。主要用于承担调频、负荷备用和紧急事故备用，有调节能力的水电站机组均可承担旋转备用容量。设计中常采用系统事故备用容量的50%与负荷备用容量之和。

非旋转备用容量　电力系统中处于停机待命状态，但可随时起动的备用容量。其并入电网发出额定功率的时间，短则几分钟，长则十多个小时。用于承担部分事故备用容量。

运行中，系统的备用容量并非一成不变，而是根据系统负荷和电源组成情况而变化，而且备用容量在各电站间，以及在本电站内也可以转化。例如，水电站在丰水年或丰水季节工作容量宜大些，备用容量宜小些，甚至不担备用容量，备用容量较多或全部转到火电厂；在枯水期，水电站备用容量则应大一些。

bengta

崩塌　(land fall)　陡坡上部岩土体在重力作用下崩落堆积于坡脚的现象。规模巨大、突然的崩塌称为山崩。在土体中发生的崩塌称为土崩。在坡麓地带堆积的岩质崩塌物称为倒石堆。崩塌冲击力强、破坏性大，有时还会造成交通断绝、河道堵塞以及人员的伤亡，是山区常见的自然地质灾害。1933年，中国四川省茂县叠溪地震时发生山崩堵塞岷江干流，形成了迄今犹存的堰塞湖——叠溪海子。

岩体崩塌形式　主要有：①散块崩落。岩块沿斜坡以滚动或跳动的方式向下崩落。②块体翻落。与斜坡脱开的块体在失去平衡后，以翻落的形式向下崩落。③整体坠落。整块岩体沿地质结构面滑动，脱离基岩后呈自由落体状态坠落。

崩塌形成条件　包括：①地形条件。崩塌与斜坡的地形、地质条件密切相关。一般崩塌多发生在高而陡峻的岩质边坡，在地势高差大的峡谷山区，崩塌现象比较普遍。②岩性条件。岩性软硬不一的坡体，常因底部软层的风化剥蚀或水流淘蚀，使上部岩体失去支撑而崩塌。③构造条件。陡坡上部岩体被平行于边坡方向的高倾角裂隙切割，最有利于崩塌的形成。促进崩塌发生的外部因素有风化作用、水作用、地震及人为因素等，如强烈地震或特大暴雨往往会急剧改变斜坡的稳定条件而发生大规模的崩塌；此外，不适当的施工爆破和坡脚开挖也常直接触发崩塌。

崩塌防治　需结合斜坡的地形、地质条件因地制宜，采用或综合考虑削坡、锚固、排水、修建支挡建筑物以及表面封闭防护等防治措施。

bizhuansu

比转速 (specific speed) 几何相似的水轮机（水泵水轮机）在1m水头下发出1kW功率时所具有的转速。它是反映水力机械技术经济的综合指标。当水头（扬程）、功率或流量都已确定时，比转速直接反映水力机械的转速水平。对于冲击式水轮机，通常指一个喷嘴的比转速。

水轮机比转速和水泵水轮机的水轮机工况比转速定义相同，用n_s表示，单位取m·kW。表达式为

$$n_s = n\frac{\sqrt{P_{out}}}{H^{5/4}} \tag{1}$$

或

$$n_s = 3.13 n_{11}\sqrt{Q_{11}\eta} \tag{2}$$

式中n为转速，r/min；P_{out}为输出功率，kW；H为工作水头，m；n_{11}为单位转速，r/min；Q_{11}为单位流量，m^3/s；η为水力效率。

蓄能泵比转速和水泵水轮机的泵工况比转速一般都用流量比转速表示，指蓄能泵（水泵水轮机）扬程为1m、流量为$1m^3/s$时的转速，用n_q表示，单位取$m \cdot m^3/s$。表达式为

$$n_q = n\frac{\sqrt{Q_p}}{H_p^{3/4}} \tag{3}$$

或

$$n_q = n_{11}\sqrt{Q_{11}} \tag{4}$$

式中n为转速，r/min；Q_p为流量，m^3/s；H_p为扬程，m；n_{11}为单位转速，r/min；Q_{11}为单位流量，m^3/s。

水轮机、水泵水轮机和蓄能泵在不同的工况点运行，具有不同的比转速。在工程设计中，对水轮机一般取额定工况点（额定转速n_N、额定水头H_N、额定功率P_N）的比转速，对蓄能泵和水泵水轮机一般取最大流量点（通常为额定转速n_N、最小扬程$H_{p,min}$、最大流量$Q_{p,max}$）的比转速作为代表，用来比较比转速的高低。

在相同水头（扬程）、功率（流量）条件下，所选用的水轮机（或水泵水轮机、蓄能泵）比转速高，说明其额定转速高、机组尺寸小，所以提高比转速对降低机组造价有利。

对反击式水轮机、水泵水轮机、蓄能泵，比转速提高也意味着转轮（叶轮）内水流速度加大，空化性能恶化。因此，它们的比转速受空化条件限制，提高十分缓慢。对冲击式水轮机，当射流直径和转轮直径已确定时，其比转速与喷嘴数的平方根成正比。因此，提高冲击式水轮机比转速的途径主要是增加喷嘴数。国际上喷嘴数最多的冲击式水轮机具有6个喷嘴，但喷嘴数的增加也受到结构、强度等限制，特别是水头超过800m时。

水力机械比转速的高低与其型式、适用水头（扬程）范围有较为明显的对应关系。各种型式水轮机的适用水头范围与比转速n_s的大致范围见表1。适用于不同扬程段的混流式水泵水轮机比转速n_q的大致范围见表2。

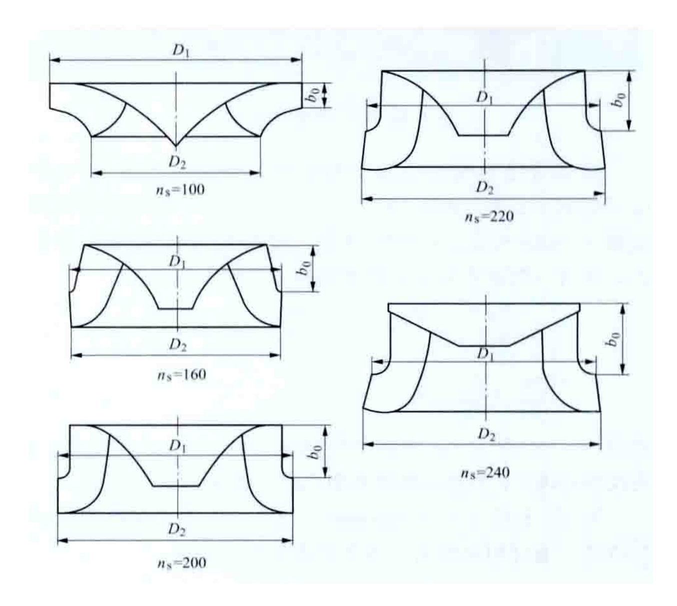
表1 各种型式水轮机的适用水头范围与比转速n_s的大致范围

水轮机型式	适用水头范围 (m)	比转速n_s的大致范围 (m·kW)
轴流式	3～80	900～200
混流式	30～700	350～50
冲击式	300～1800	35～10（单嘴）

表2 适用于不同扬程段的混流式水泵水轮机比转速n_q的大致范围

适用扬程范围 (m)	比转速n_s的大致范围 ($m \cdot m^3/s$)
100～200	70～50
200～400	50～35
400～600	35～25

水力机械比转速的高低与其通流部件的形状有较为明显的对应关系。以混流式水轮机为例，如图所示。$n_s=200$时，转轮进、出口直径接近相等；$n_s<200$时，转轮进口直径大于出口直径；$n_s>200$时，转轮出口直径大于进口直径。同时，比转速越低，其导叶相对高度越小，进水流道越狭窄，转轮叶片数越多。轴流式水轮机、水泵水轮机、蓄能泵也有类似规律。



不同比转速的混流式水轮机转轮外形

D_1—转轮进口直径；D_2—转轮出口直径；b_0—导叶高度

bixu rongliang

必需容量 (essential capacity) 见装机容量。

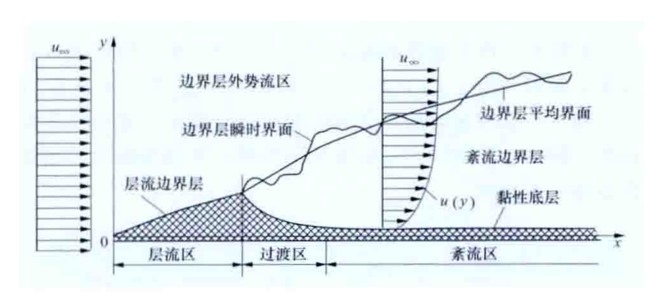
bianjieceng

边界层 (boundary layer) 黏性流体流动时，边壁或界面附近存在的流速梯度很陡的薄层。又称附面层。水电站溢流坝面水流、挑流消能形式中的水射流等，都存在边界层问题。边界层内，因黏性流无滑动的条件，黏附于物面的流体速度为零，或者外层流体速度为零，则沿界面外法向流速以很陡的梯度上升，直至达到边界层外的流速值。边界层外，仍保持着不受边壁或界面扰动的来流速度分布，可视为流体黏性不起作用的势流区。

边界层理论已发展为流体力学的一个重要分支，广泛应用于航空、船舶、水利水电工程和水力机械等的设计中。边界层研究的内容主要有：层流边界层的稳定性、层流边界层向紊流边界层的过渡、紊流边界层中质量动量热量的传递、边界层的阻力、边界层的分离、边界层的控制、复杂边界的

三维边界层等。水电工程中的边界层问题，常是大雷诺数、非直线陡底坡（纵向压力梯度 $\mathrm{d}p/\mathrm{d}x \neq 0$）、水力粗糙边壁，有时还是有自由面的三维流动。

边界层的典型形态可用平板上边界层的生成、发展来说明，如图所示。雷诺数 $Re_x = \frac{u_\infty x}{\nu} < 3 \times 10^5$ 范围内，边界层内流动为层流型，称层流边界层；当 $Re_x > 3 \times 10^6$ 以后则转变为紊流边界层，但在平板表面由于黏附作用而存在着黏性底层；在上述两者之间是由层流向紊流的过渡区。



边界层典型形态示意图

把流场分为近壁边界层和层外流区的概念是 1904 年 L. 普朗特（L. Prandtl，1875—1953）提出的，他从纳维-斯托克斯（Navier-Stokes）方程出发，根据边界层薄而长的特点，导出二维恒定不可压缩流体的边界层方程组为

$$\begin{cases} \overline{u}\dfrac{\partial \overline{u}}{\partial x} + \overline{v}\dfrac{\partial \overline{u}}{\partial y} = -\dfrac{1}{\rho}\dfrac{\partial \overline{p}}{\partial x}\left[(\nu + \varepsilon_T)\dfrac{\partial \overline{u}}{\partial y}\right] \\ \dfrac{\partial \overline{u}}{\partial x} + \dfrac{\partial \overline{v}}{\partial y} = 0 \end{cases}$$

式中 $\overline{u}$、$\overline{v}$ 为 x、y 方向的时均流速；$\overline{p}$ 为时均压力；ρ 为流体密度；ν 为运动黏性系数；ε_T 为紊流涡黏性系数。

T. V. 卡门（T. V. Karman，1881—1963）进而利用动量原理，通过积分得出了边界层动量积分方程

$$\frac{\mathrm{d}\delta_2}{\mathrm{d}x} + (2 + H_{12})\frac{\delta_2}{u_\infty} \times \frac{\mathrm{d}\overline{u}_\infty}{\mathrm{d}x} = \frac{1}{2}c_f$$

$$c_f = \frac{2\tau_0(x)}{\rho u_\infty^2}$$

式中 u_∞ 为边界层外流速；c_f 为剪应力系数；$\tau_0(x)$ 为距离 x 处的壁面剪应力；$H_{12} = \delta_1/\delta_2$ 为边界层形状参数。

在边界层问题中，用各种名义厚度说明边界层特性，如定义 $u(y) = 0.99u_\infty$ 的位置高度 δ 为边界层名义厚度。

$\delta_1 = \int_0^\infty \left(1 - \frac{u}{u_\infty}\right)\mathrm{d}y$，称为边界层位移厚度

$\delta_2 = \int_0^\infty \frac{u}{u_\infty}\left(1 - \frac{u}{u_\infty}\right)\mathrm{d}y$，称为边界层动量（损失）厚度

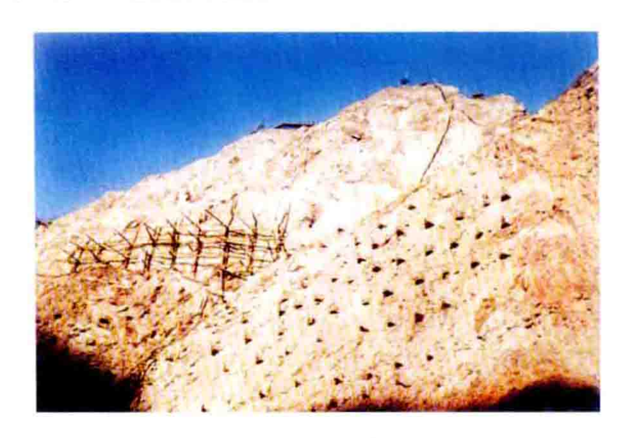
$\delta_3 = \int_0^\infty \frac{u}{u_\infty}\left(1 - \frac{u^2}{u_\infty^2}\right)\mathrm{d}y$，称为边界层能量（损失）厚度

参考书目

Schlichting H. Boundary-Layer Theory. Translated by Kestin J. Seventh Edition. New York：McGraw-Hill Publishing Co.，1979.

bianpo chuli

边坡处理（slope protection） 通过采取削坡开挖、锚喷、截排水、置换、支挡、压坡固脚、监测等措施，对可能危害建筑物安全的人工边坡或自然边坡进行有效补强和跟踪检查，以确保边坡在可能出现的各种工况下维持稳定，见图。影响边坡稳定的内在因素包括岩土体的构成与特性、岩土体结构特征、地应力状态、岩土体中软弱面（带）的分布及性状等，这些因素对边坡稳定起控制作用。另外，岩石风化卸荷、地表水和地下水活动、地震和人为作用等外在因素对边坡稳定也有影响，并与内在因素结合，进一步促使边坡变形的发生和发展。水电工程建设和运行期间，枢纽工程区和近坝库岸边坡一旦发生失稳，可能造成人员伤亡、设备损毁、建筑物倒塌、滑坡涌浪，甚至可能导致溃坝，后果不堪设想。要保证边坡工程安全、稳定，必须做好边坡工程设计、施工及边坡安全监测。



李家峡水电站边坡处理

边坡工程设计 结合工程地质勘察和边坡稳定分析，研究边坡稳定性对工程安全的可能影响，针对性地提出保证边坡安全和建筑物免受边坡失稳影响的对策。边坡工程设计涵盖地质勘察分析与评价、稳定性分析和风险分析、加固处理措施设计、施工技术要求、安全监测设计和事故应急预案等。

对边坡工程地质条件的认识是一个由表及里、由浅入深的过程，同时边坡稳定性状况可能受到开挖卸荷、地下水变化和爆破损伤的影响，因此边坡处理设计是一个动态的设计过程。①前期设计工作中，通过工程地质、水文工程地质勘察与分析，掌握边坡的地层、岩性、构造、水文地质条件和物理地质现象，查明边坡边界条件，研究可能的变形破坏形式，预测边坡变形破坏的规模、特征及其对工程的危害性，提出边坡处理设计方案。②工程施工过程中，结合地质编录和安全监测分析，进一步复核边坡工程地质条件、荷载与作用以及岩土体物理力学参数，开展边坡稳定性的预测、预报和预警，研究调整边坡处理设计参数和施工方法，达到确保边坡稳定、安全的目的。

边坡工程施工 遵循设计对施工的要求，边坡应自上而下分层开挖和支护。在岩质边坡的开挖中，应采用预裂爆破、光面爆破、减震爆破等爆破控制技术，合理地设定爆破震动控制标准，减轻爆破震动的不利影响。边坡稳定状况不同，开挖与锚喷支护的施工时序也有差别，选择合理的喷锚支护时间尤为重要。对于尽量小心开挖或严格控制爆破仍然可能导致失稳的边坡，要采取预加固措施；对于局部稳定性差的边坡，支护加固措施要及时跟进；对于工程地质条

件尚好，能够维持一定自稳时间的边坡，可采取适时支护措施；对于地质条件好、开挖边坡缓，能够保持长期稳定的边坡，可以不支护或仅随机支护，支护时机选择具有更大的余地。

对于一些遇水敏感且稳定性较差的边坡，开挖前坡顶外边缘要先形成排水沟，有些甚至要先完成坡体排水洞或排水孔幕。边坡开挖要尽量避开雨季，并力争一次处理完成。雨季施工时，要采用临时封闭措施，防止恶化边坡稳定条件。排水孔、排水洞可能导致边坡岩体局部渗透梯度增大，不利于破碎岩体的渗透稳定性，相应部位要设置必要的反滤保护措施。

坡面上开洞要先锁口，采取短进尺弱爆破掘进，或由内向外、短进尺弱爆破掘出。采用混凝土置换方法治理边坡，需要在坡体内开挖形成大洞室，如果措施不当，对边坡的危害甚至可能大于加固处理的效果。

边坡安全监测　按照设计要求，开展现场巡查和安全监测，及时消除隐患，确保边坡在施工期和运行期的各个阶段始终处于良好状况。施工期安全监测资料要及时反馈至设计与施工，以便对边坡开挖、锚喷支护和施工方案进行修改和调整。运行期安全监测资料应及时分析和评价，作出预测和预报，提示可能存在的安全隐患，以便工程管理机构及时决策边坡补强加固和风险防范工作。

结合边坡结构的特点，选择主要监测内容。一般性边坡的稳定安全监测以表面变形监测为主，重点监测特征部位坡面位移和坡面裂缝的变化。复杂且重要边坡的稳定安全监测还包括地下水位监测、深部变形监测以及加固结构的应力应变监测等。要结合日常巡视检查情况，定期对监测资料进行整理分析，客观反映监测物理量的时空变化情况，分析测值变化规律，对特征值和变化过程中的特殊点、特殊线段作出合理解释，对变形率增大和发生突变等情况要特别予以分析和说明，评价边坡工程的运行性状，预判可能出现的问题，对存在的安全隐患提出处理意见和建议。

bianpo gongcheng dizhi kancha

边坡工程地质勘察　(engineering geological investigation for slope)　为查明与分析评价边坡工程地质条件所进行的综合调查工作。目的是采用工程地质测绘、勘探、试验等手段，查明边坡地形地貌、地质结构、边界条件、稳定状况等，为边坡治理设计提供地质依据。在水电工程中涉及边坡勘察的场区有水库、枢纽、料场、辅助工程等，一般随勘察阶段逐步加深勘察精度。对大型边坡或重要边坡则采取专门性勘察，必要时开展勘察期间边坡安全监测工作。

勘察内容　岩质边坡包括：①调查河谷和溪沟的形态、对称情况、切割深度、阶地分布与掩埋情况，查明自然边坡的高度、坡度及坡形。②查明组成边坡的地层岩性、软弱夹层（带）的分布、性状与成因类型，划分工程地质岩组。③确定边坡所在的褶皱部位和岩层产状及其变化，划分边坡结构类型；查明对边坡稳定有影响的结构面的分布、产状、性状；进行节理裂隙统计，计算节理连通率；分析各类结构面及其组合的块体与坡面的关系，初步确定可能的变形破坏方式。④查明边坡岩体卸荷裂隙的分布、规模及特征，进行卸荷带划分；查明边坡岩体风化程度，划分风化带；分析卸荷与风化的关系。⑤收集边坡区水文、气象资料；查明地下水类型、补排条件、地下水位埋深及变幅、泉水分布与流量变化；查明边坡岩体的渗透性和水文地质结构；地下水位观测时段不宜小于1个水文年。⑥进行边坡岩体物理力学特性测试，重点研究对边坡稳定性有影响的软弱夹层（带）的变形特性和不同条件下的抗剪强度。土质边坡勘察内容还应查明土层底部基岩面起伏形态、边坡变形迹象及土体物理力学特性等。

勘察方法　主要有工程地质测绘、勘探、试验等。①边坡工程地质测绘。范围应包括工程所涉及的边坡及可能对边坡稳定性有影响的地段。地质测绘比例尺可根据边坡的规模及地形、地质条件确定。边坡纵、横向勘探线与测绘剖面应布置在具有代表性的部位，边坡纵向主勘探线和剖面宜沿主要位移或滑动方向布置，横向勘探线及剖面宜在其上、中、下3个部位布置。②边坡工程地质勘探。应在地质测绘工作的基础上进行，一般以钻探、洞（井）探为主，辅以物探、槽探等。③岩土体物理力学性质试验。试验项目主要包括岩土的成分测定以及物理性质、水理性质和力学性质试验。按试验场所分为室内试验和现场试验。

稳定性分析　在查明工程地质条件的基础上，根据边坡岩土类型和结构、边坡破坏类型等选择适宜的稳定性分析方法。边坡稳定性计算之前，应根据边坡水文地质、工程地质、岩土体结构特征以及已经出现的变形破坏迹象，对边坡的破坏形式和稳定性状态作出判断，确定边坡破坏的边界范围、破坏地质模型及破坏趋势。边坡稳定性分析方法分为定性分析和定量分析。定性分析方法有自然历史分析法、工程地质类比法、图解分析法。定量分析方法有岩体质量分级法、有限元法、极限平衡分析法。其中极限平衡分析法是边坡稳定计算的基本方法。极限平衡分析法包括适宜土质边坡的圆弧形滑动分析法，以及适宜岩质边坡的平面型滑面滑动分析法、楔形体滑动分析法、折线形滑面滑动分析法和倾倒破坏分析法。边坡稳定状况由安全系数来衡量，工程边坡安全系数应满足规范的安全控制标准要求。

边坡监测　为掌握边坡稳定状况动态，检验边坡稳定性分析结果与治理措施的效果，以及预测边坡变形发展趋势提供依据，勘察期间应对边坡变形情况进行稳定性监测。监测内容一般包括地表和地下变形监测、地下水监测、应力监测等，其中以边坡变形监测为重点。

bianxing celiang

变形测量　(deformation survey)　对建筑物、构筑物及其地基或一定范围内的岩土体的位移、沉降、倾斜、挠度、裂缝等进行的周期性重复测量工作。水电工程中的变形测量包括动态变形测量和静态变形测量。动态变形测量指采用固定监测仪器进行长时间的数据采集，获得变形数据序列。静态变形测量是周期性地对建筑物进行变形测量。测量内容主要有垂直位移（沉降）、水平位移、倾斜、裂缝、挠度、日照和风振等。

测量方法　有地面常规大地测量、地面摄影测量、特殊和专业的测量、空间定位测量、三维激光扫描测量等。

（1）常规大地测量。利用全站型仪器，尤其是全自动跟踪全站仪可以进行一定范围内无人值守、全天候、全方位的自动监测。测量精度可达亚毫米级。缺陷是受测程限制，测站点一般都在变形区域的范围之内。

（2）地面摄影测量。由于摄影距离不能过远，因此绝对精度较低。

（3）特殊和专业的测量。利用光、机、电测量技术对变形体的自动观测，包括应力应变测量、准直测量和倾斜测量。例如采用引张线系统、激光准直系统、正（倒）垂系统等，运用遥测垂线坐标仪等自动读数设备，其分辨率可达0.01mm；采用光纤传感器测量系统将信号测量与信号传输合二为一，具有很强的抗雷击、抗电磁干扰和抗恶劣环境的能力，便于组成遥测系统，实现在线分布式监测。

（4）空间定位测量。以全球导航卫星系统（global navigation satellite system，GNSS）为主，用于变形监测的作业方式可划分为周期性和连续性两种模式。

（5）三维激光扫描测量。通过高速激光扫描大面积、高分辨率地快速获取被测对象表面的三维坐标数据，可以快速、大量、高精度地获取空间点位及其变化信息。

发展趋势　包括：①应用多种传感器、数字近景摄影、全自动跟踪全站仪和GNSS，向实时、连续、高效率、自动化、动态测量系统的方向发展；②时空采样率大大提高，为变形分析提供更为丰富的数据信息；③采用高度可靠、实用、先进的监测仪器和自动化系统，可在恶劣环境下长期稳定、可靠地运行；④实现远程在线实时监控、网络监控，在大坝、桥梁、边坡体等工程中发挥巨大作用，推动重大工程安全监控管理的发展。

biaodi

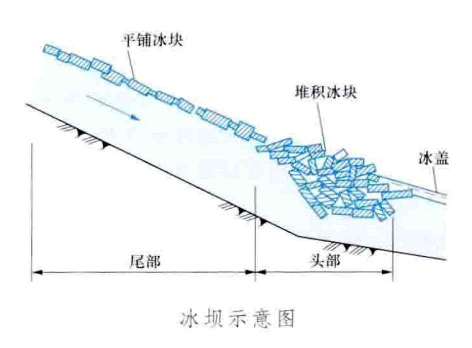
标底　(base bid price)　招标人为利于工程质量、工期、安全和投资的目标控制，根据管理需要在招标过程中按照价值规律、市场行情等对招标工程项目（标的）编制的造价期望价，是评标的参考。招标人可以自行决定是否编制标底。一个标的只能有一个标底，标底必须保密。

标底由项目建设法人自行编制或委托具有相应资质的造价咨询单位编制。编制依据为：招标文件（包括商务条款、技术要求和标准、图纸与工程量清单等），当前施工技术和价格水平，国家与行业现行定额和费用标准。标底编制方法一般采用制造成本法，包括直接成本（人工、材料、施工机械费用成本）和间接成本，并在总成本中加上必要的加价，包括承包人的总部管理费、不可预见费、利润、税金等。人工、材料、施工机械消耗量应在本标的条件下按平均先进水平确定，可参考国家和行业部门颁发的现行预算定额确定，或根据工程所需要的资源配置分析确定。

bingba

冰坝　(ice dam)　河流解冻时，由上游流下的大量冰块受阻而形成的冰块堆积体。其外形如图所示。冰坝严重堵塞河道时，往往会导致其上游水位急剧上升，造成上游城镇及工矿区受淹，或抬高水电站尾水位，减少发电量。当冰坝承受不住上游河段的冰和水的压力时即自然溃决，大量流冰突然下泄，撞击沿河两岸建筑物，会造成较大损失。冰坝持续时间较短，一般仅为几天。

形成条件　包括：①动力条件。解冻开河时上游来水量增加，或封冻时河槽蓄水量大，在解冻时下泄并逐段累积，是形成冰坝的必要条件。②河道形态。游荡性河道及河槽宽、窄、深、浅变化大的河道易形成冰坝。③河流流向。由低纬度向高纬度流动的河流（段），由于上游气温高于下游，上游先于下游开河，则大量冰块受阻于下游冰盖前而形成冰坝。如黄河内蒙古河段和山东利津河段，以及东北的黑龙江上游和松花江下游。



冰坝示意图

防止措施　包括：①利用上游水库调节流量。下游河道封冻前加大泄流量形成较高的冰盖，增加冰盖下过水面积；解冻时减少下泄流量或适时分水，是防止形成冰坝的有效措施。②破冰。一旦冰坝形成，可采用爆破、飞机轰炸、炮轰、破冰船撞击等破冰方法，或撒土融冰。③冰情预报。掌握冰情变化，可及早采取措施，防止形成冰坝。

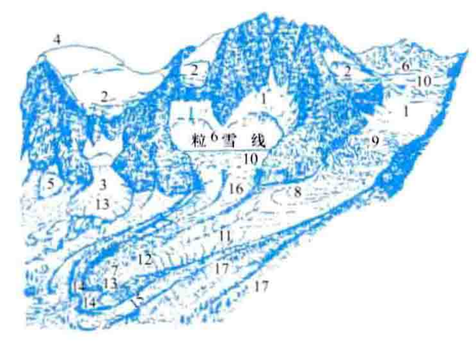
bingchuan

冰川　(glacier)　分布在陆地上长期存在的、处于运动状态的巨大天然冰体。地球上的冰川分为大陆冰川和山岳冰川两大类。大陆冰川分布于高纬度两极地区，又称冰盖冰川。山岳冰川分布于中、低纬度高山上，又称高山冰川。两类冰川规模悬殊，地球上冰川面积的97%、冰储量的99%分布于南极和格陵兰岛。南极冰盖面积1398万km^2，平均厚度2000～2500m，最大厚度超过4000m。山岳冰川以亚洲中部高山区最为发育，喀喇昆仑山是中低纬度地区最大的冰川分布中心，大冰川众多，在山谷中形成复杂的树枝状山谷冰川。

雪线为永久积雪的下限，又称零平衡线。在这个高度，每年降落的雪，刚好在当年融化完。雪线随季节有升降，亦称季节雪线。雪线还随纬度由赤道向两极降低直至海平面。雪线是冰川学上的一个重要标志，控制着冰川的发育和分布。雪线以上常年积雪的洼地称粒雪盆，接受降雪和周围山坡的雪崩、冰崩补给，是冰川的积累区。雪线以下的冰舌是冰川的消融区。山岳冰川形态受地形控制，在河谷源头或谷坡凹地的圈椅状地形发育的冰川称冰斗冰川，多发育在雪线附近的高程上；悬挂在陡坡上呈盾牌状的冰体称悬冰川；在高山平顶或夷平面上发育的冰川称平顶冰川或冰帽；比冰斗冰川规模大，分布于山谷底部的冰川称山谷冰川。山谷冰川是山岳冰川的成熟阶段，拥有山岳冰川的全部特征（见图），对周围环境有巨大影响，是冰川工作者的重点研究对象。

流动是冰川的主要特征，粒雪盆中的冰雪累积到一定厚度，在重力影响下沿谷坡向低处流动，进入消融区。在缓慢的流动过程中，冰体发生形变，出现断裂、褶皱，同时也塑造了地形，形成独特的侵蚀地形，如U形谷、冰坎等。冰

川挟带的碎石、岩块统称冰碛，依据冰碛的分布和堆积形态可以了解冰川发展的过程和趋势。中国现代冰川一般有2～3列冰碛，是16～19世纪小冰期的例证。



山岳冰川略图

1—山谷冰川；2—悬冰川；3—再生冰川；4—冰帽；5—雪崩冰川；6—粒雪盆；7—冰谷；8—弧形连拱；9—冰瀑布；10—横裂隙；11—冰井；12—冰桌；13—冰洞；14—终碛；15—侧碛；16—中碛；17—古冰碛

冰川融水对冰源河流的径流起着调节作用。中国天山、祁连山的山岳冰川融水是农牧业的重要水资源。冰川湖泊可发电供水。冰川消融及冰湖溃决形成的冰川泥石流和洪水会给人民生命财产带来损失。研究冰川演变过程可为长期气候变化、水文变化、海面升降提供依据。

中国是世界上山岳冰川最发育的国家之一，山岳冰川广泛分布于喜马拉雅山、昆仑山、横断山、祁连山、天山、东帕米尔、阿尔泰山和青藏高原山地，总面积58 651km²，总储量51 322亿m³，年平均融水量563亿m³，是长江、黄河、澜沧江、怒江、雅鲁藏布江等大河的源流。中国内流河区分布的冰川属大陆性冰川，约占全国冰川总面积的一半以上，具有降水少、气温低、雪线高、消融弱、运动速度慢的特点。分布在外流河区的冰川属海洋性冰川，具有降水多、气温高、消融强、运动速度快的特点。

bingling

冰凌 (ice) 河道中静止冰和流动冰的统称。河流冰凌在热力、动力及河道地形条件的作用下，产生结冰、流冰、封冻、解冻、冰塞和冰坝等现象，称为冰情。在水利水电工程的规划、设计、施工及运行中，需考虑冰凌的危害，分析研究其发展变化规律，并制订相应的防冰措施。主要问题有冰坝、冰塞对水利水电工程施工及运行的威胁，冰压力对水工建筑物的影响，冰花堵塞水电站进水口、拦污栅等。

冰凌形态 河流在结冰过程中，由于气温、流速及河道地形边界条件不同，冰凌形态也各异。主要形态有：①冰凇。在水流平缓处漂浮在水面的冰晶，一般多呈针状或松散的片状。②岸冰。沿河岸结成的冰层，一侧固结于岸边，另一侧浮于水面。③冰花。浮于水面或水中的冰凇、棉冰和冰屑等。④水内冰。在水面以下任何部位结成的冰。⑤流冰。随水流流动的冰块或少量冰花。⑥冰盖。覆盖水面的固定冰层。⑦锚冰。冻结在水面以下建筑物或河底的冰。⑧清沟。封冻期河流中未冻结的水沟。⑨冰塞。冰盖下面因大量冰花堆积，阻塞部分过水断面，造成上游水位壅高的现象。⑩冰坝。河流解冻时，由于上游流下的大量冰块受阻形成的冰块堆积体。

冰情演变过程 按照河道中冰的形态变化，可分为结冰、封冻和解冻3个时期。从河流开始结冰日到形成冰盖日为结冰期。从形成冰盖日到冰盖融解日为封冻期。从冰盖融解日到流冰停止日为解冻期。3个时期总称为冰期。中国北方河流所处纬度不同，冰期也长短不一。最北部黑龙江开库康站自10月出现结冰至翌年5月解冻长达200天左右；而黄河郑州站，冰期约40天。

影响冰情的因素 主要有热力、动力及河道特征3个因素：①热力因素。气温下降低于水温时使水体散失热量，当水温降到0℃以下时将结冰。气温上升使水体得到热量，当水温高于0℃时冰将融化。②动力因素。包括水位、流量、流速、风向、风速、波浪等。冬季流冰期，同样的热力条件，如流速大、顺流方向风速高，能推迟封冻；反之，则容易封冻。解冻开河时，如流量大、水位上涨快及顺流风力强，常强行开河，造成灾害，称武开河；反之，冰盖逐渐融化，形成文开河。③河道特征。包括地理位置，河流走向及河道边界条件。同样的热力、动力条件，各河流的封冻时间不同。解冻时，在弯道及滩地较多的河段，容易形成冰坝。

bingqing guance

冰情观测 (ice regime observation) 对寒冷季节江河、湖泊、水库出现结冰、封冻和解冻的冰情及其变化过程进行观察、测量和记录。冰情资料对各种水工建筑物的设计、施工、运行管理及防御江河凌汛都有重要作用。冰情观测的基本内容是冰情目测和冰情图测绘、固定冰厚测量、冰流量测验、水内冰观测。

冰情目测和冰情图测绘 为了系统地了解冰情变化过程，一般在水文测站附近选择有代表性的河段，在整个结冰期，按适当频次用目测或望远镜测记冰情现象。主要冰情现象有初生冰、岸冰、流冰花、流冰、封冻、连底冻、冰上流水、融冰、冰层浮起、冰滑动、溜冰堆积、冰塞、冰坝、解冻和终冰日期。冰情复杂不易用文字记录时，需绘制冰情图，整个冰期不少于3次。如地形复杂或河段较长，可用地面摄影、航空摄影或机载侧视雷达测绘冰情图；发生严重冰坝现象或需要了解大范围冰情时，可利用卫星遥感信息获得的资料绘制冰情图。

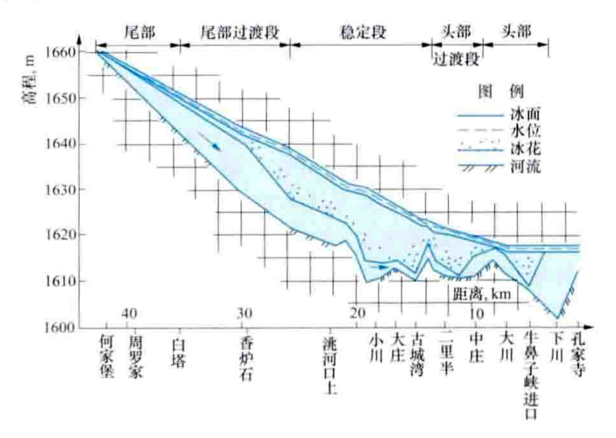
固定冰厚测量 目的是系统地收集封冻冰层厚度变化过程资料。测量冰厚的地点，与清沟、岸边、浅滩及河上冬季道路应有足够的距离，没有泉水流入或污水排泄的影响。测量时，用冰穿、冰钻等工具先开凿冰孔，用量冰尺测量冰厚、水浸冰厚（冰层凿孔所量得的自由水面至冰底面的距离）。有冰花及冰上有雪时，要同时测冰花厚及冰上雪深。测量次数以能掌握冰厚度变化过程为准，一般从水体封冻后开始，至解冻时停止，每1～5天测一次。

冰流量测验 单位时间内通过测验断面的冰块体积或冰花的折实体积称为冰流量。实测冰流量河段要求河道顺直，水流平稳，河宽及岸冰间敞露水面宽大体一致。测量内容包括敞露水面宽、流冰或流冰花的疏密度（流冰或流冰花面积与敞露水面面积的比值）、冰块或冰花团的流速与厚度、冰花的密度等。根据测得资料计算冰流量。以每次实测冰流量与相应疏密度建立关系曲线，用连续观测的疏密度推算冰流量变化过程及质量。

水内冰观测　对水面以下任何部位存在的冰量进行测量。水内冰数量通常以一日或数日内冻结在水下标准形状铁丝网上冰的质量表示，可将铁丝网放入预定位置，定时取出测量。

bingsai

冰塞　(ice jam)　河流封冻初期，冰盖下大量冰花、冰块堵塞部分过水面积，造成上游水位壅高的现象。示意如图。



冰塞体部位

冰塞形成需具备的条件：①有足够的来冰量，是形成冰塞的必要条件。上游必须是未封冻的河段，水流才能与寒冷的大气进行热交换，产生大量冰花和冰块。②河道地形条件。冰塞一般发生在水流不畅、比降突然变缓的河段，如急弯及狭窄的河段或水库回水末端。③封冻冰盖前缘处的流速需大到某临界值，流冰及冰花才能潜入冰盖以下。该临界流速常用弗劳德数判别，即

$$Fr=v/\sqrt{gH}$$

式中 Fr 为弗劳德数；v 为冰盖前缘的平均流速；g 为重力加速度；H 为平均水深。

根据黄河盐锅峡水库回水末端产生冰塞的实测资料分析，当 $Fr\geqslant0.09$ 时，冰花潜入冰盖下形成冰塞；当 $Fr<0.09$ 时，冰花难于下潜，而在冰盖前缘平铺，使冰盖向上游发展。

中国黄河上游刘家峡河段于1961年冬盐锅峡水库建成蓄水后，至1967年刘家峡水库建成前，连续5个冰期发生严重的冰塞壅水现象。冰花最大堆积厚度超过10m，冰塞壅水位较冬季平均水位高9m，造成其上游刘家峡大坝基坑及主要公路被淹。在进行寒冷地区工程设计时，需分析研究冰塞发生的可能性，并进行壅高度计算，以分析冰塞可能带来的危害。

bolang

波浪　(water wave)　液体自由表面受外力扰动而产生的周期性起伏振动现象。又称液体自由表面波。波浪是一种常见的水面波动现象，其特征是水体质点作周期性振动，并由于水的黏性而向外传播。波浪运动携带着能量，常冲击堤防、库岸、码头，导致建筑物坍塌、破坏。20世纪后期，开始研究利用波浪能作为新能源。

液面波浪运动因主要作用力的不同而分为重力波和表面张力波两类。表面张力波较少见，如风力较小时水面出现的涟波（波长小于3cm，周期小于0.1s）。日常所见的波浪运动多是重力波，其按扰动源的不同又可分为两类：一类是扰动加于自由表面而形成的波动，如风生波、船行波、击水波等；另一类是扰动来自液体内部而形成的波动，如地震波、潜艇或水下爆炸涌起的水面波动。此外，广义的波浪运动还包括由太阳、月球引力而引起的潮汐现象等。

重力波的学科分类按其运动特性划分为：小振幅（微）波与有限振幅波、深水波（短波）与浅水波（长波）、推进波与驻波、自由波（余波）与强迫波等。

水利水电工程中的波浪问题主要有：水库（湖泊）风生波、库岸坍塌激起的涌浪、枢纽泄洪或电站机组改变负荷时在下游河道形成的涌波、船舶航行在水库或河道中形成的船行波等。

波浪运动的要素是水深 H、波长 λ、波高 h、周期 τ、波速 c，以及波幅 a（$a=h/2$）、波数 R（$R=2\pi/\lambda$）、频率 f（$f=1/\tau$）等。常见的自由表面重力推进波，按水深与波长之比分为

深水波（短波）　$H/\lambda\geqslant1/2$

浅水波（长波）　$H/\lambda<1/20$

中水波　$1/2>H/\lambda\geqslant1/20$

深水波与浅水波的波形和运动特性有明显的差异：深水波波峰较为平坦，而浅水波波峰较为陡峻；深水波波面附近水质点运动近似为圆周运动，在水面以下约1倍波长处，水质点已几乎不动，具有明显的表面性，而浅水波波面附近水质点呈椭圆状轨迹运动，直至水底质点运动轨迹退化为椭圆两焦点间的一段平线，整个水域的水质点都在动。

表述自由表面重力推进波的理论有：

（1）势波理论——针对深水小振幅波。

（2）圆余摆线理论——针对深水有限振幅波。

（3）椭圆余摆线理论——针对浅水有限振幅波。

（4）随机波理论——针对海洋、湖泊、水库中的风生波。这些波因水面以上气流因素的随机性而生成为随机波。

参考书目

Dean R G, Dalrymple R A. Water Wave. Mechanics for Engineers and Scientists. New York: Prentice Hall, Inc., 1984.

budan yaxian

补淡压咸　(salinity control with freshwater replenishing)

利用水电站水库调节水量的功能来补充河口淡水流量，以压制咸潮，保障河口地区的供水安全。

汇入海洋的河流在枯水期流量较小，海水涨潮时会发生咸水上溯现象。海水上溯受潮汐、入海淡水流量、水力坡降、地理位置、风向等因素的影响。一般情况下，海水上溯距离与上游淡水来量成反比。通过上游电站水库的调节，增加枯水期的上游淡水来量，能有效减小海水上溯距离。

中国珠江三角洲地区，受流域持续干旱、上游来水偏枯、流域工农业用水增加等因素的共同作用，海水上溯活动渐趋强烈。从2005年开始，珠江及其上游的水电站（如天生桥一级水电站、龙滩水电站）实施了多次枯水期水量调

度，保障了珠江三角洲地区的供水安全。

Bulacike Shuidianzhan

布拉茨克水电站 (Bratsk Hydropower Station)

位于俄罗斯西伯利亚叶尼塞河支流安加拉河上。开发任务以发电为主，兼有航运、供水等综合利用效益，见图1。电站初期总装机容量4500MW，远景装机容量5000MW，多年平均年发电量226亿kW·h。2008～2012年对机组进行更新改造，可增加年发电量3.5亿kW·h。电站以500kV超高压输电线路与西伯利亚联合电力系统连接。



图1 布拉茨克水电站

水文和水库特性 电站位于贝加尔湖下游，天然径流经湖泊调节，较稳定。坝址以上流域面积73.6万km²，多年平均年径流量917亿m³，正常蓄水位402.00m，相应库容1690亿m³，水库面积5500km²，可进行多年调节。水库淹没林地35.7万hm²、草场16.6万hm²。电站按10000年一遇洪水设计，设计洪水流量11930m³/s。

工程地质条件 坝址基岩为坚实的辉绿岩。

枢纽布置 枢纽工程由大坝、泄水建筑物、厂房等组成，见图2。

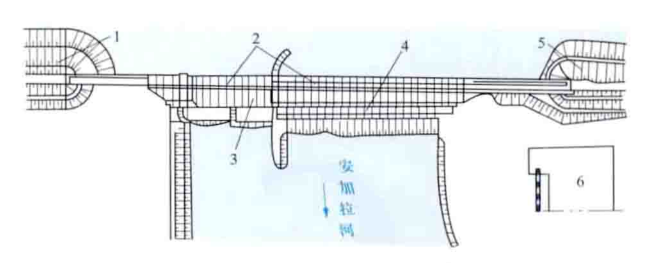


图2 布拉茨克水电站枢纽平面布置图

1—右岸土坝；2—混凝土宽缝重力坝；3—溢流坝；4—发电厂房；5—左岸土坝；6—屋外开关站

大坝 由混凝土宽缝重力坝和左、右岸土坝等组成。最大坝高125m，顶长1430m，缝宽7m。左、右岸土坝长分别为723m和2987m。河床部分长924m。

泄水建筑物 溢流坝位于右侧，设10个孔口尺寸为18m×16m（宽×高）的溢流孔，泄流能力为7090m³/s。

厂房 坝后式厂房，总长515m。初期18台机组，单机容量初为225MW，20世纪70年代更换发电机绕组，单机容量增至250MW。混流式水轮机，转轮直径5.5m，额定水头100m，设计流量254m³/s，转速125r/min；发电机额定功率250MW，额定电压15.75kV，额定功率因数0.85。主变压器布置在坝和坝后厂房之间的平台上。屋外开关站设在左岸。

工程施工 工程于1955年开始施工准备，1959年截流，1961年第一台机组发电，1966年18台机组全部投入运行。2008～2012年对机组进行更新改造。

提前发电措施 为提前发电，第一台机组进水口高程比其他机组进水口高程低25m。投产时靠坝体临时断面挡水，断面下游面保持1∶0.8的平均坡度。第一台机组发电时，大坝混凝土工程量仅完成60%，厂房混凝土工程量仅完成77%，右岸土坝尚未动工。

主要工程量 混凝土浇筑485.8万m³（其中坝体混凝土437万m³），土石方开挖380.5万m³，土石方回填1249.2万m³，金属结构和机械设备安装38770t。



cailiao lixue

材料力学 (mechanics of materials) 研究对象是工程材料及其构件（柱、梁、杆件、板壳等），研究物体在载荷作用下的力学性能以及外载荷与构件应力、应变、位移之间的关系，是固体力学的一个分支。自1638年G. 伽利略（G. Galileo，1564—1642）研究悬臂梁的强度开始，就有了材料力学的雏形。随后胡克定律（1678年）、欧拉压杆临界荷载公式（1757年）、纳维平截面假设（1826年）、卡氏定理（1875年）、莫尔应力圆（1882年）等重要成果相继提出，使材料力学不断发展，解决了许多工程力学问题，并成为结构力学等学科及工程设计的基础。

研究内容 材料力学是一门试验与理论分析相结合的学科，其研究内容主要包括材料力学性能及构件力学分析两大部分。

（1）材料力学性能研究。通过试验，研究材料在不同载荷条件下的变形和应力变化规律，测定弹性模量、泊松比、屈服应力、抗拉强度、抗压强度、抗剪强度、疲劳强度等力学性能参数。材料的力学性能参数是固体力学其他分支应力分析中的基本依据之一。

（2）构件力学分析。运用静力学平衡条件，假定材料是均匀连续的弹性体和变形时满足平截面假设，可以推导得出物体的应力、应变和位移公式，包括杆件的拉压、梁的弯曲、轴的扭转等。有时还涉及其他复杂问题，如曲梁的弯曲，弹性地基上的梁、组合断面的梁、钢筋混凝土梁、平板和壳体、长柱的临界压力，非圆截面轴的扭转，薄壁结构分析以及动载荷和温度载荷作用下的有关问题。

研究任务 包括：①对已知尺寸和材料性能参数的构件进行力学分析，确定其在无过量变形、失稳和断裂、破坏情况下抵抗指定载荷的能力；②对已知载荷和应用环境下的构件，选择适当材料，确定构件的形状和尺寸，以实现其预定功能。

参考书目

铁摩辛柯 S P，盖尔 J. 材料力学. 胡人礼，译. 北京：科学出版社，1978.

Timoshenko S P，Gere J. Mechanics of Materials. New York：Van Nostrand Reinhold Company，1972.

cengliu

层流 (laminar flow) 黏性流体低速流动时质点层次分明的流动形态。层流状态下，流体黏性对层流运动起着主导作用，流场内层间物质既不相互穿越，亦不相互掺混，如流场固体边壁附近的层流边界层、紊流边界层内紧贴边壁的黏性底层、平行两壁面狭缝间的泊肃叶流动、微细颗粒在黏性液体中自由沉降的斯托克斯流动、滴灌设备中的毛细管水流、多孔介质中的渗流、机械润滑油流动等。1883年英国人O. 雷诺（O. Reynolds，1842—1912）通过管道水流试验首先揭示出层流和紊流是实际流体运动的两种基本形态，并以雷诺数 $Re=\rho vd/\mu$ 作为流态判别准则（其中 ρ 为流体密度，v 为流动速度，d 为管道直径，μ 为流体动力黏性系数）。在圆管流动中，保持稳定层流运动的下临界雷诺数 $Re=2320$，而上临界雷诺数受外来扰动影响没有定值，有时 Re 达12 000。

层流运动的阻力系数 λ 仅是雷诺数的函数，圆管试验给出 $\lambda=64/Re$（见水流阻力），其水力损失与流速的一次方成正比。层流运动的内剪力 τ 远小于紊流状态时的剪应力，一般由牛顿内摩擦定律表示

$$\tau=-\mu\frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}y} \tag{1}$$

有些液体流动的剪应力不满足牛顿定律，称为非牛顿流体。

表征层流运动的基本方程是纳维-斯托克斯（Navier-Stokes）运动方程和连续方程

$$\frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t}=F-\frac{1}{\rho}\nabla p+\frac{\mu}{\rho}\nabla^2 v \tag{2}$$

$$\mathrm{div}v=\frac{\mathrm{d}u}{\mathrm{d}x}+\frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}y}+\frac{\mathrm{d}w}{\mathrm{d}z}=0 \tag{3}$$

式中 v、F 分别为由向量表示的流速向量和单位质量力；u、v、w 分别表示坐标 x、y、z 方向的流速分量；ρ 为流体密度；∇p 为压强梯度；$\frac{\mu}{\rho}\nabla^2 v$ 项为黏性阻力。

一些典型初边值条件下的层流运动，可直接求解纳维-斯托克斯运动方程，得到精确解、近似解或数值解。结果给出层流近壁流速分布为抛物线型。

参考书目

章梓雄，董曾南. 黏性流体力学. 北京：清华大学出版社，1998.

chaguan

岔管 (bifurcated pipe) 压力管道由一根分为两根或多根时分岔处的管段。岔管是压力管道的重要组成部分，其特点是位置靠近厂房、结构复杂、水头损失较为集中。由于主管和支管连接处的管壁相互切割，岔管段的管壁已不再呈完整的圆形，在内水压力或外水压力的作用下产生较大的不平衡力，应力条件复杂，需增设加固构件或加强管壳结构。

岔管按形状分，有Y形、非对称Y形和三岔形3种（见图1）；按所处环境分，有露天式和埋藏式；按结构形式分，主要有三梁岔管、月牙肋岔管、球形岔管、无梁岔管、贴边岔管等。Y形岔管具有流量分配对称、均匀的优点，多用于一条压力管道为两台机组引水的布置；非对称Y形岔管多用于一条压力管道为多台机组引水的布置；三岔形岔管可用于“一管三机”的布置。露天式岔管多为钢岔管，小型工程的低水头岔管也有采用钢筋混凝土岔管的。水电站埋藏

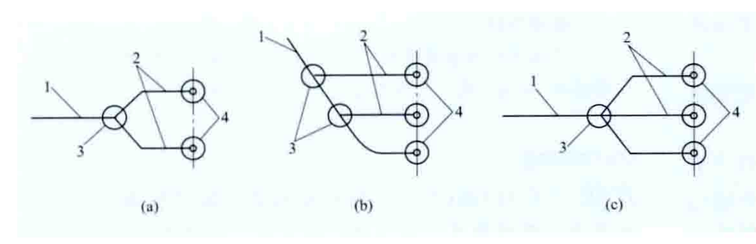


图1　岔管布置简图

(a) Y形；(b) 非对称Y形；(c) 三岔形

1—主管；2—支管；3—岔管；4—水轮机

式岔管主要为引水隧洞内的岔管，多采用钢岔管回填混凝土与围岩联合受力的形式；当山体雄厚、各向地应力均比内水压力大，围岩透水性弱、围岩强度能够承受内水压力时，可采用钢筋混凝土岔管。中国建成的一大批高水头、大容量抽水蓄能电站（见广州抽水蓄能电站、天荒坪抽水蓄能电站），其压力管道上的岔管承受的最大内水压力可达800m以上，成功地采用了钢筋混凝土岔管，节省了投资，避免了采用钢岔管带来的运输安装等困难。

三梁岔管　在岔管管壳外面用一根U形梁和两根腰梁加固的岔管（见图2）。这种岔管结构复杂、耗用钢材多，当岔管尺寸较大、水头较高时，焊接、退火和运输困难，自20世纪60年代以后多被月牙肋岔管所取代。

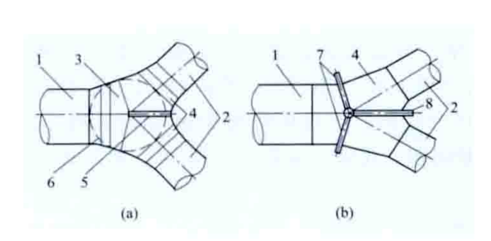


图2　月牙肋岔管和三梁岔管

(a) 月牙肋岔管；(b) 三梁岔管

1—主管；2—支管；3—主锥管；4—支锥管；5—月牙肋；6—公切球；7—腰梁；8—U形梁

月牙肋岔管　在岔管分岔处用插入管壳内的月牙形肋板加强的岔管。主管和两根支管做成锥形，并与公切球相切（见图2）。这种岔管结构受力条件好，节省钢材用量。

球形岔管　由球壳，主、支管，补强板和管内导流板组成的岔管。球壳的半径一般为主管半径的1.3～1.6倍。适用于高水头、较小管径的场合。

无梁岔管　用球壳片与渐变的锥管将主、支管相连的岔管。

贴边岔管　用内贴和外贴补强板加固主、支管连接处，主要用于小的卜形岔管。

chanheliao

掺合料 (admixture)

混凝土中掺入的磨细矿物材料或粉状工业废料。它是水泥的辅助材料或混凝土的填充料，掺入混凝土中可以改善混凝土性能，提高混凝土质量并节约水泥。随着掺入工艺的成熟，掺合料大多在现场拌制混凝土时掺入。它也可以在水泥工厂粉磨水泥时掺入。掺合料作为胶凝材料的一部分，掺入量一般大于水泥质量的5%。在水电工程碾压混凝土中，掺合料最高掺量达胶凝材料总质量的70%。

分类　分活性与非活性两类。活性掺合料水化后本身不能硬化或硬化很微弱，但可与水泥中析出的氧化钙作用，能加速混凝土凝结硬化并提高强度，粉煤灰、硅粉、火山灰、矿渣粉、凝灰岩、硅藻土等都属于活性掺合料。非活性掺合料基本上不与水泥发生化学反应，如石灰岩石粉、黏土等。

使用目的　包括：①使用掺合料替代一部分水泥，能改善混凝土性能，增加混凝土拌合物的和易性，减少离析，减少用水量和水泥用量，使混凝土的密实性和抗渗性显著提高，也降低了混凝土的水化热温升，对防止混凝土温度裂缝十分有利；②高活性的掺合料是配制某些特种混凝土的重要材料之一；③火山灰质掺合料（如粉煤灰）能加强混凝土在硫酸盐质水中的抗化学侵蚀性，提高混凝土抵抗浸析作用的抗水性，能抑制碱活性骨料反应（见混凝土骨料），防止混凝土开裂。

质量要求　各种掺合料的料源选择、开采、加工、运输、保管、检验以及掺用工艺等都应符合质量要求，其中最基本的是材料自身质量及其掺量。主要有：①活性水硬性掺合料的活性指标，是以1g掺合料的氧化钙（CaO）吸收量（mg）表示，分为高活性、中活性和低活性3级，使用时应做材料试验鉴定；②磨细度一般与所用水泥的细度相同；③对混凝土有害的有机杂质，其烧失量不得大于规定的限值；④掺合料中的硫酸和亚硫酸化合物的含量，换算成三氧化硫（SO_3）不应超过规定的限值；⑤非活性掺合料代替混凝土中的水泥量应按混凝土设计要求规定的限值，其28天龄期的混凝土抗压强度降低的百分数不应超过限定值；⑥非活性掺合料的掺量，应根据混凝土设计要求，限定需水量增加的百分数和坍落度减少的百分数。

使用　掺合料使用的原则是质量合格、性能适应、使用方便、成本较低等。在混凝土中掺入掺合料时，一般需同时掺入减水剂等外加剂，使用部位及最优掺量应通过试验决定。在水电工程中应用最多的掺合料是粉煤灰，粒化高炉矿渣、硅粉等以其不同特性也得到有效的使用。粉煤灰活性好、效能高、资源丰富，是效益较优的一种掺合料，随着火力发电业的发展，粉煤灰的排放量日益增多，采用粉煤灰作为混凝土掺合料是保护环境和综合利用资源的重要措施之一。黏土类非活性掺合料存在需水量高、强度低、干缩量大等缺点，在水工混凝土和钢筋混凝土中较少掺用，然而其料源最广、价格较低，所以在要求低的或临时性工程中使用是适宜的。

chanqi shuiliu

掺气水流 (aerated flow)

高速水流与空气接触的界面，因水质点的紊动而导致气水两相掺混的现象。掺气水流属气液两相流。掺气后的水流在外观上呈白色泡沫或棉絮状，气水界面粗化，气相以气泡或气囊的形态掺入水中，水相则以跃移水团的形式扩散到周围空气中。

水流掺气与水中含气是两种不同的概念。水中含气指溶解于水中，人眼看不到的各种空气分子，即使水体静止，含气量也不会有大变化，水中含气量总是小于当地水的饱和含气量；水流掺气则指由于水流紊动而挟持的浮游气泡，人眼

可见，水流一旦停止流动，气泡即从水中逸出，运动水流的掺气浓度总是大于水的饱和含气量。

掺气类型　高水头泄水建筑物中水流掺气现象有明渠水流掺气和射流掺气与雾化两种类型。

(1) 明渠水流掺气。主要是确定水流掺气后的“水深”，用于估算溢流坝、陡坡明渠、明流隧洞设计中的边墙超高。大量的原体观测资料为估算掺气水深 h_c 提供了许多经验公式，一般都是以水流不掺气时的水力因素（即假定水流不掺气时的清水水深 h_1，m；水力半径 R_1，m；断面平均流速 v_1，m/s）组成参数来表征掺气后的有关各量。其中，包含因素比较全面，具有代表性的明渠掺气水深关系式为

$$\beta=\frac{h_1}{h_c}=A\left(\frac{v_1^2}{gR_1}\times\frac{n\sqrt{g}}{R_1^{1/6}}\times\frac{B}{h_1}\right)^m$$

式中 β 为含水度，是不掺气时的清水水深 h_1 与掺气后水深 h_c 之比；A 为经验常数；n 为过流面糙度系数；B/h_1 为断面宽深比；g 为重力加速度。括号内 3 项参数分别表示水流运动特性、阻力特性和断面特性。据现有资料统计，系数 $A=0.937$，指数 $m=-0.088$。

(2) 射流掺气与雾化。高水头泄水建筑物采用挑流消能形式时，挑流水股在空中扩散、掺气，可提高消能效果，但挑射水股回落至下游河道时反弹形成雾化区，会影响水电站出线和开关站布置。因此，采用挑流掺气消能时，要控制泄流雾化范围。

掺气发生条件　一般认为明渠水流自然掺气的临界条件是

流速　$v_1>6.5\text{m/s}$

弗劳德数　$Fr_1=v_1\sqrt{gR_1}\geqslant 5$

能坡　$J>(Fr_1/28)^{1.5}$

溢流坝上水流由堰顶发展起来的紊流边界层到达水面，是掺气发生的必要条件，实际溢流坝上的边界层，是大雷诺数、粗糙边壁、具有自由面而底壁具有竖向曲率的三维流动，比理想条件下的边界层计算要复杂得多，实用中多按经验关系估计边界层发展至水面的距离，来定掺气发生点位置 L_i，最简单的形式是将其视为单宽流量 q 的函数，如

$$L_i=Bq^b$$

由原体实测资料给出系数 $B=10\sim14.7$，系数 $b=0.53\sim0.72$。

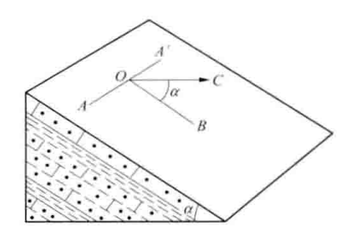
掺气减蚀　20 世纪中期，A. J. Peterka (1953) 和 P. C. Ranbnepun (1971) 等人的研究揭示了：水中掺气浓度大于 1%，空蚀情况将明显减轻；大于 6%～8%，空蚀几乎可以完全避免。因此，可采用工程措施使近壁水流掺气，从而减免建筑物遭受空蚀破坏。掺气减蚀的工程形式有：掺气槽、掺气坎（微突折流器）、突跌错台等。掺气减蚀技术的主要研究内容是：掺气设施的体型尺寸、最优位置及其在水流近壁形成稳定空腔的水力条件，掺气槽供气系统及空腔进气量测算，掺气槽下游近壁水层掺气浓度的沿程变化规律及防蚀有效保护范围，掺气设施承受的水动力载荷，掺气设施室内试验的缩尺效应等。

参考书目

中国水利水电科学研究院，南京水利科学研究院．水工模型试验．2版．北京：水利电力出版社，1985．

chanzhuang

产状　(attitude)　地质结构面（岩层层面、片理面、断层面、节理面等）的空间几何方位，包括走向、倾向和倾角 3 个要素（见图）。走向是地质结构面的延伸方向，用水平面与地质结构面的交线（AOA'）的方向表示，如 N40° E（或 NE40°）、N60°W（或 300°）。倾角是垂直于走向方向上地质结构面与水平面之间的夹角（α），表示该面在空间的倾斜程度。倾向是地质结构面的倾斜方向（OC，箭头指倾向方向），亦以磁方向表示，如 NE、NW、SE、SW 等。



地质结构面产状示意图

地质结构面的产状可用地质罗盘在野外现场量测。产状三要素的表示次序一般是走向、倾向、倾角，如 N40°W、SW∠30°或 320°、SW∠30°，其中 N40°W 或 320°为走向，SW 为倾向，∠30°为倾角；也有用倾向和倾角表示的，如 95°∠30°，95°为倾向角，此时走向为 N5°E，可以相互转换。

Chang Jiang Sanxia Shuili Shuniu

长江三峡水利枢纽　[Changjiang (Yangtze) River Three Gorges Hydroproject]　位于中国长江干流湖北省宜昌市三斗坪镇，下距葛洲坝水利枢纽约 40km，是开发和治理长江的关键性骨干工程，具有巨大的防洪、发电、航运等综合利用效益，见图 1。电站总装机容量 22 500MW，16 回出线 500kV 交流输电线路，向华中地区、重庆市输电，并以±500kV 直流线路 1 回向华东输电、1 回向广东输电。

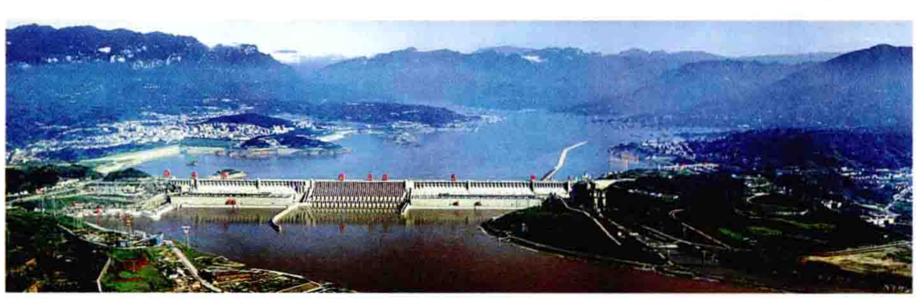


图 1　长江三峡水利枢纽

设计研究沿革　20 世纪 20 年代前后，孙中山提出在三峡建坝的设想，在其《建国方略》中对此进行了详细展望。30～40 年代，中华民国国民政府与美国内政部垦务局（U. S. Bureau of Reclamation，USBR）合作，进行过初步的工程勘测和设计工作。1949 年中华人民共和国建立后，组织开展了大规模的科研、规划和勘测设计工作。1959 年完成了《长江流域综合利用规划要点报告》，1990 年《长江流域综合利用规划简要报告》修订并经国务院批准，均论证并推荐长江三峡工程为治理开发长江的骨干工程。

1986～1989 年，中国组织了 412 位专家分 14 个专题对工程可行性进行重新论证，提出了“一级开发、一次建成、分期蓄水、连续移民”的建设方案。水利部长江水利委员会据此编制了《长江三峡水利枢纽可行性研究报告》，1992 年第七届全国人民代表大会五次会议审议通过《关于兴建长江三峡工程决议》。1993 年 7 月，国务院三峡工程建设委员会审查批准了《长江三峡水利枢纽初步设计报告（枢纽工程）》。

水文和水库特性 大坝控制流域面积 180 万 km^2，坝址处年平均径流量 4510 亿 m^3，年平均输沙量 5.3 亿 t。主要建筑物按 1000 年一遇洪水设计，10000 年一遇加 10%洪水（可能最大洪水）校核；相应洪峰流量分别为 98 800m^3/s 和124 300m^3/s；相应库水位分别为 175m 和 180.4m。水库为季调节型，正常蓄水位 175m，防洪限制水位 145m，枯季消落低水位 155m。总库容 450 亿 m^3，防洪库容 221.5 亿 m^3，调节库容 165 亿 m^3，死库容 171.5 亿 m^3。水库面积 1084km^2。水电站最大水头 113m，最小水头 71m，加权平均水头 90.1m。

工程地质条件 坝址建筑物地基为坚硬、完整的闪云斜长花岗岩，岩体内断层、裂隙不发育，透水性微弱。库、坝区地壳稳定，坝区地震基本烈度为Ⅵ度。

水库库岸总体稳定条件良好。稳定条件较差的库段仅占库岸总长的 1.2%。有 100 万 m^3以上的大中滑坡体 140 处。根据研究分析，滑坡体均位于大坝上游 26km 以远处，滑坡引起的涌浪对大坝等枢纽建筑物不会构成威胁。

枢纽布置 枢纽工程由大坝、副坝、泄水建筑物、厂房、通航建筑物等组成，见图 2。

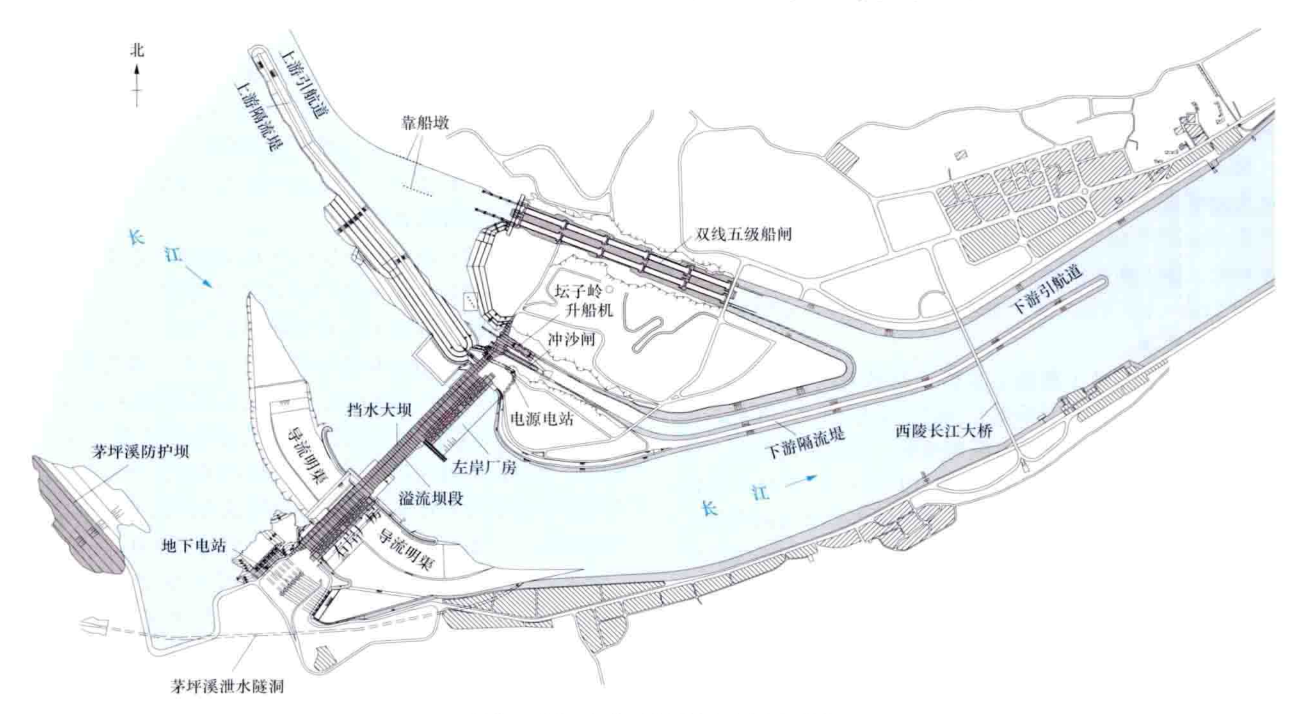


图 2 长江三峡工程平面布置示意图

大坝 混凝土重力坝，轴线全长 2309.47m，坝顶高程 185.00m，最大坝高 181m。

副坝 茅坪溪副坝位于右岸上游 1km 的茅坪溪出口处，为碾压式沥青混凝土心墙坝，坝高 93m，主坝轴线长 1070m，堰顶高程 185.00m，堰顶宽 20.0m。心墙底宽 3.0m，顶宽 0.5m。

泄水建筑物 泄洪坝段位于主河道，前缘总长 483m，共设有 23 个深孔和 22 个表孔，相间布置。深孔尺寸为 7m×9m，孔底高程 90.00m；表孔净宽 8m，堰顶高程 158.00m。下游采用挑流消能。正常蓄水位为 175.00m 时，枢纽最大泄洪能力（含机组及排漂孔过流）为 98 740m^3/s。在左、右岸电厂进水口下部共布置 7 个直径为 4.5m 的排沙孔，进口底高程分别为 70.00m 和 90.00m。在泄洪坝段两段各布置 1 个排漂孔，孔宽 10.0m、高 12.0m，进口底高程 133.00m；在右岸厂房右侧设 1 个排漂孔，孔宽 7.0m、高 17.0m，进口底高程 133.00m。

厂房 由左、右岸电站，地下电站，电源电站 3 部分组成，见图 3。左、右岸电站为坝后式厂房，位于溢流坝段两侧的厂房坝段长度分别为 643.7m 和 584.2m，主厂房净宽 34.8m，结构总高 93.8m，安装 26 台单机容量为 700MW 的混流式水轮发电机组（左岸 14 台、右岸 12 台），装机容量 18 200MW；坝式进水口底坎高程 108.00m，压力管道采用钢衬钢筋混凝土联合受力形式，内直径为 12.4m。地下电站位

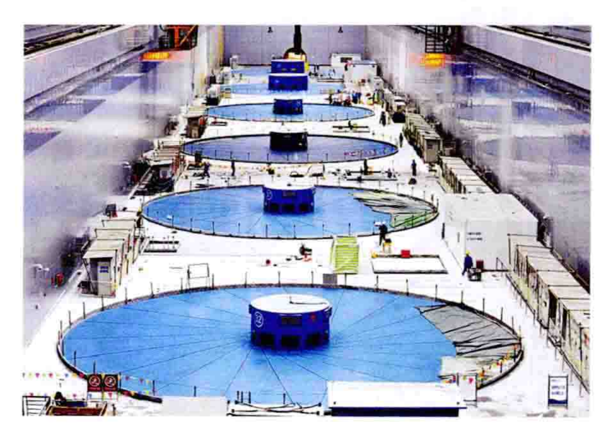


图 3 三峡地下电站厂房

于右岸山体内，主厂房最大跨度 32.6m、高 86.24m、长 329.5m，布置 6 台 700MW 机组，装机容量 4200MW；尾水洞为变顶高形式，城门洞形，出口最大尺寸为 15.0m×24.5m（宽×高）。电源电站位于左岸山体内，安装 2 台 50MW 机组，装机容量 100MW。

三峡水电站 32 台 700MW 机组均为立轴混流式水轮机，额定转速 71.4～75r/min，额定流量 913.6～995m³/s，额定水头 80～85m，设计水头 101～113m，转轮直径 9.525～10.248m；发电机额定电压 20kV，额定功率 777.8MV・A，最大功率 840MV・A。左、右岸电站主变压器及 GIS 开关站均布置在对应机组段上游的副厂房内，地下电站主变压器及 GIS 均布置在地面副厂房内。

通航建筑物　通航建筑物位于左岸，包括船闸和垂直升船机。船闸设计年单向通过能力 5000t，为双线五级连续梯级船闸，线路总长 6442m，上、下引航道长度分别为 2113m 和 2708m，单级闸室有效尺寸为 280m×34m×5m（长×宽×最小水深），可通过万吨级船队。船闸共设 24 扇人字门，尺寸为 20.2m×38.5m（宽×高），单扇门重 838t。升船机为齿轮齿条爬升式全平衡垂直升船机方案，承船厢有效尺寸为 120m×18m×3.5m（长×宽×高），可通过 3000t 级的客货轮。施工期另设单线一级临时船闸，闸室有效尺寸为 240m×24m×4m（长×宽×最小水深），配合导流明渠，满足施工通航要求。

工程施工　三峡工程施工采用三期导流，总工期 17 年（不含地下电站）。第一期导流（1993～1997 年），围护右岸叉河，修建导流明渠、混凝土纵向围堰、左岸临时船闸，江水及船舶仍从主河槽通过。第二期（1998～2003 年）截断大江，修建河床泄洪坝段、左岸电站坝段、左岸电站及永久通航建筑物，江水经导流明渠下泄，船舶经导流明渠或临时船闸通行。第三期（2004～2009 年）截断明渠，修建三期碾压混凝土围堰，水库蓄水至 135.00m 高程，左岸电站及永久船闸投入初期运用，同时修建右岸大坝和电站，见图 4。期间江水先是通过预留在溢流坝段的 22 个导流底孔（尺寸为 6m×8.5m，进口底坎高程 56.00m）下泄，2007 年汛前底孔封堵后通过泄洪深孔、表孔和电站输水系统下泄。



图 4　建设中的三峡地下电站

大江截流水深 60m，截流流量 8480～11 600m³/s，上下游戗堤进占 24h 抛投强度 19.4 万 m³。二期围堰防渗面积 8 万 m²，实测渗流量仅 65L/s。

在混凝土大坝浇筑过程中，掺用了性能优良的Ⅰ级粉煤灰和高效减水剂，并优化了混凝土配合比。在混凝土温控过程中，采用了混凝土骨料二次风冷技术。

在三峡船闸建设中，开挖一道深度为 176m 的凹槽形航道，采用高边坡开挖、控制爆破、岩体锚固、超大规模人字门制造安装等几十项技术成果。

在三峡水轮发电机组设计制造过程中，通过引进消化吸收再创新，实现了大型机电装备国产化，使中国水电装备制造技术单机容量上升到 700MW，达到世界先进水平。

工程自 1993 年开始施工；2003 年第一台机组投产发电；2008 年左、右岸电站和电源电站投产发电；2009 年建成大坝，左、右岸电站，电源电站和船闸；2012 年建成右岸地下电站；2015 年升船机将建成使用。

大坝，左、右岸电站，电源电站和船闸主要工程量：工程土石方明挖 12 251 万 m³，土石方填筑 4824 万 m³，混凝土浇筑 2807 万 m³，金属结构安装 17.09 万 t。地下电站主要工程量：土石方明挖 834.53 万 m³，土石方洞挖 154.14 万 m³，混凝土浇筑 55.06 万 m³，金属结构安装 1.98 万 t。

综合利用　长江三峡工程具有防洪、发电、航运、生态补水和抗旱等多种综合效益。

防洪　长江三峡工程是长江中下游防洪体系中的关键性骨干工程，坝址洪水占荆江河段洪水来量的 95%，占武汉以上洪水来量的 2/3 左右。水库防洪库容 221.5 亿 m³，经调节可使荆江河段防洪标准从原来约 10 年一遇提高到 100 年一遇；遇 1000 年一遇或历史上发生过的特大洪水（如 1870 年洪水），可控制上荆江洪峰流量不超过 80 000m³/s，配合分蓄洪水工程的运用，可防止荆江河段发生大量人口伤亡的毁灭性灾害；可减轻长江中下游洪水淹没损失和对武汉市的威胁，并为洞庭湖区的根本治理创造了条件。

发电　三峡电站装机 34 台（2012 年全部装机投产发电），总装机容量 22 500MW，多年平均年发电量 882 亿 kW・h，每年可替代原煤约 5000 万 t。主要向华东、华中地区及重庆市、广东省供电。长江三峡工程地处中国腹地，建成后将促进华中、川渝、华东和华南联网，可发挥显著的调峰、错峰效益。2012 年全年发电量 981.07 亿 kW・h。

航运　水库回水可改善重庆以下航道 660km，万吨级船队可直达重庆港，单向年通过能力由 1000 万 t 提高到 5000 万 t，运输成本可降低 35%～37%。经水库调节，宜昌下游最枯流量可从 3000m³/s 提高至 5000m³/s 以上，长江中游枯季航运条件也将得到改善。

三峡船闸 2003 年 6 月 18 日向社会船舶开放，截至 2011 年底，过闸货运量达 4.6 亿 t，加上翻坝转运货物，通过三峡枢纽区段的货运总量达 5.5 亿 t。2011 年，三峡船闸通过货物10 033万 t，其中上行货运量 5534 万 t、下行货运量 4499 万 t，提前达到设计 2030 年船闸单线下行 5000 万 t 的通过能力指标。

生态补水和抗旱　在枯水期，考虑到中下游航运、生活生产、河口压咸、生态用水需求，三峡水库在秋冬枯水季节实施补水调度，加大下泄流量，从 4000m³/s 提高至 5000～6000m³/s。2009～2010 年的枯水期，累计补水 141 天，总量 139.7 亿 m³。

设计单位　水利部长江水利委员会长江勘测规划设计有

限公司。

建设单位 中国长江三峡集团公司。

Chang Jiang shuixi shuineng ziyuan

长江水系水能资源 [hydropower resources of Changjiang (Yangtze) River System] 据《中华人民共和国水力资源复查成果(2003年)》统计,长江水系水能资源理论蕴藏量为24 335.98亿kW·h/a,其中技术可开发量11 878.99亿kW·h/a。长江水系技术可开发水能资源占中国水能资源的比重为48%,主要分布于长江干流和雅砻江、大渡河、乌江、嘉陵江、汉江和赣江等主要支流的干流,以上河流技术可开发年发电量占全水系的75%。在十四大水电基地中,该水系包含了金沙江、长江上游、雅砻江、大渡河、乌江、湘西六大水电基地。水系内水能资源分布见表。

长江水系水能资源统计表

河流名称	流域面积(万 km^2)	河长(km)	落差(m)	多年平均流量(m^3/s)	理论蕴藏量(亿kW·h/a)	技术可开发量		
						电站数量(座)	装机容量(MW)	年发电量(亿kW·h)
全水系	180.85				24 335.98	5748	256 272	11 878.99
1. 干流		6300	5400	30 480	8024.83	34	106 890.3	5005.26
2. 支流					16 311.15	5714	149 382.6	6873.73
一、江源—宜宾河段					10 601.61	831	119 647.5	5926.78
1. 干流(金沙江)	47.32	3481	5142	4600	5090.55	29	76 745.3	3648.26
2. 支流					5511.06	802	42 902.2	2278.52
(1) 雅砻江水系	12.84				3363.47	317	34 660.8	1842.42
(2) 牛栏江/横江水系	1.32/1.48	423/307	1660/2080	121/296	387.14	63	2294.2	105.00
(3) 中小支流					1760.44	422	5947.3	331.11
二、宜宾—宜昌河段					9885.29	2323	102 812.6	4750.52
1. 干流					2172.95	5	30 145.0	1357.00
2. 支流					7712.35	2318	72 667.6	3393.52
(1) 岷沱江水系及中小支流	13.58	735	3560	2790	1407.58	390	8418.3	465.96
(2) 大渡河(青衣江)水系	9.08	1155	4175	1570	3486.00	630	35 236.7	1736.12
(3) 赤水河水系	2.04	460	1588	309	129.25	76	1173.6	53.44
(4) 嘉陵江水系	16.00	1120	2300	2100	1413.56	397	11 150.6	485.95
(5) 乌江水系	8.79	1037	2124	1600	895.76	312	13 994.1	539.28
(6) 中小支流					380.20	513	2694.4	112.77
三、宜昌以下河段					3849.08	2594	33 812.8	1201.69
1. 干流					761.33			
2. 支流					3087.75	2594	33 812.8	1201.69
(1) 清江水系	1.67	428	1430	421	215.43	126	4095.6	117.93
(2) 洞庭湖水系	26.28				1423.79	1188	15 290.8	596.83
(3) 汉江水系	15.5	1577	1962	1550	948.85	488	8167.2	285.25
(4) 鄱阳湖水系	16.22				386.19	540	5134.9	170.29
(5) 中小支流					113.49	252	1124.3	31.40

资料来源:《中华人民共和国水力资源复查成果(2003年)》。技术可开发量的数据随着前期工作的深入会有变化和调整。

长江发源于中国青藏高原的腹部,流域面积180.85万km^2,干流全长6300km以上,流经青海、西藏、云南、四川、重庆、湖北、湖南、江西、安徽、江苏、上海共11个省(市、自治区),注入东海。河口多年平均年径流量9613亿m^3,是中国最长、径流量最大的河流。长江支流众多,各级支流共7000多条,单河理论蕴藏量达10MW以上的河流有1697条,流域面积5万km^2以上的支流有:雅砻江、岷江及其支流大渡河、嘉陵江、乌江、沅江、湘江、汉江和赣江。长江干流在支流当曲汇入前称沱沱河,汇入后到巴塘之间称通天河,巴塘以下到宜宾称金沙江,宜宾以下始称长

江。其中，宜宾到宜昌段又称川江，枝江到城陵矶段又称荆江，在江苏镇江以下又有扬子江之称。国际上普遍称长江为扬子江（Yangtze River）。

江源—宜宾河段　该河段流经青海、西藏、四川、云南4省区，长3481km，落差5142m。宜宾（屏山水文站）多年平均流量4600m³/s。江源至宜宾河段包括金沙江干流、雅砻江水系、牛栏江、横江水系及其他中小支流。该河段理论蕴藏量10601.61亿kW·h/a，占长江水系的43.6%，其中干流5090.55亿kW·h/a，占全河段的48.0%；支流5511.06亿kW·h/a，占全河段的52.0%。

该河段水能资源十分丰富，其技术可开发水电站831座，装机容量119647.5MW，多年平均年发电量5926.78亿kW·h，分别占长江水系的46.7%和49.9%，分别占中国技术可开发量的22.1%和24%。其中，干流水电站29座，装机容量76745.3MW，多年平均年发电量3648.26亿kW·h，分别占该河段总量的64.1%和61.6%；支流802座，装机容量42902.2MW，多年平均年发电量2278.52亿kW·h，分别占该河段总量的35.9%和38.4%。

该河段大型水电站共有38座，装机容量103362.0MW，多年平均年发电量5057.75亿kW·h，分别占全河段技术可开发量的86.4%和85.3%。其中装机容量1000MW及以上的水电站33座，装机容量10000MW及以上的水电站2座（白鹤滩、溪洛渡）。

该河段中的金沙江为深谷型河道，有适宜于建高坝的条件，径流丰富，水头集中，技术可开发29座水电站，装机容量76745.3MW，多年平均年发电量3648.26亿kW·h，占全水系的30%，是长江水系中技术可开发资源最丰富的河段。主要支流雅砻江流域面积12.84万km²，在四川省攀枝花市汇入金沙江，河口处多年平均流量1930m³/s。雅砻江干流长1571km，落差3870m，水能资源理论蕴藏量3363.47亿kW·h/a，可开发16座大型水电站，装机容量27510MW，多年平均年发电量1455.66亿kW·h，是仅次于金沙江的水能资源丰富的河流。两河口水电站、锦屏一级水电站和二滩水电站的水库是雅砻江梯级调节径流的控制性工程。

宜宾—宜昌河段　该河段穿过四川盆地与三峡山地，河长1030km，落差219m，是长江宜昌以下成灾洪水的主要来源区段之一。包括宜宾至宜昌长江干流、岷沱江水系（含大渡河）、赤水河水系、嘉陵江水系、乌江水系及其他中小支流。理论蕴藏量10MW及以上的河流共673条，理论蕴藏量9885.29亿kW·h/a，占长江水系的40.6%，其中干流2172.95亿kW·h/a，占该河段的22.0%；支流7712.35亿kW·h/a，占该河段的78.0%。技术可开发水电站2323座，装机容量102812.6MW，多年平均年发电量4750.52亿kW·h，分别占长江水系技术可开发量的40.1%和40.0%。其中干流5座，装机容量30145MW，多年平均年发电量1357亿kW·h，分别占该河段总量的29.3%和28.6%；支流2318座，装机容量72667.6MW，多年平均年发电量3393.52亿kW·h，分别占该河段总量的70.7%和71.4%。

该河段大型水电站共有50座，装机容量71445.0MW，多年平均年发电量3187.95亿kW·h，分别占技术可开发量的69.5%和67.1%。其中，装机容量1000MW及以上的水电站20座，规模最大的为长江三峡水利枢纽，装机容量22500MW，多年平均年发电量884亿（单独）～899亿kW·h（联合）。

岷江水系流域面积13.54万km²，发源于四川和甘肃两省交界的岷山南麓，于四川省宜宾市汇入长江。河口处多年平均流量2850m³/s。岷江干流长735km，落差3560m，水能资源理论蕴藏量1407.58亿kW·h/a。其上游是深谷型河道，中下游是盆地形河道。岷江干流技术可开发水电站26座，利用水头1702m，装机容量4575MW，多年平均年发电量为255.05亿kW·h。大渡河（含青衣江）是岷江的最大支流，于乐山市汇入岷江。大渡河流域面积9.08万km²，河口处多年平均流量1570m³/s。大渡河干流长1155km，天然落差4175m，水能资源理论蕴藏量3486.00亿kW·h/a，技术可开发水电站37座，利用水头3044.5m，装机容量24725MW，多年平均年发电量1188.26亿kW·h。

乌江水系流域面积8.79万km²，大部在贵州省境内，于重庆市涪陵市汇入长江。河口处多年平均流量1600m³/s。乌江干流长1037km，水面落差2124m，水能资源理论蕴藏量504.42亿kW·h/a。乌江干流技术可开发水电站17座，利用水头1380m，装机容量10422MW，多年平均年发电量为395.42亿kW·h。

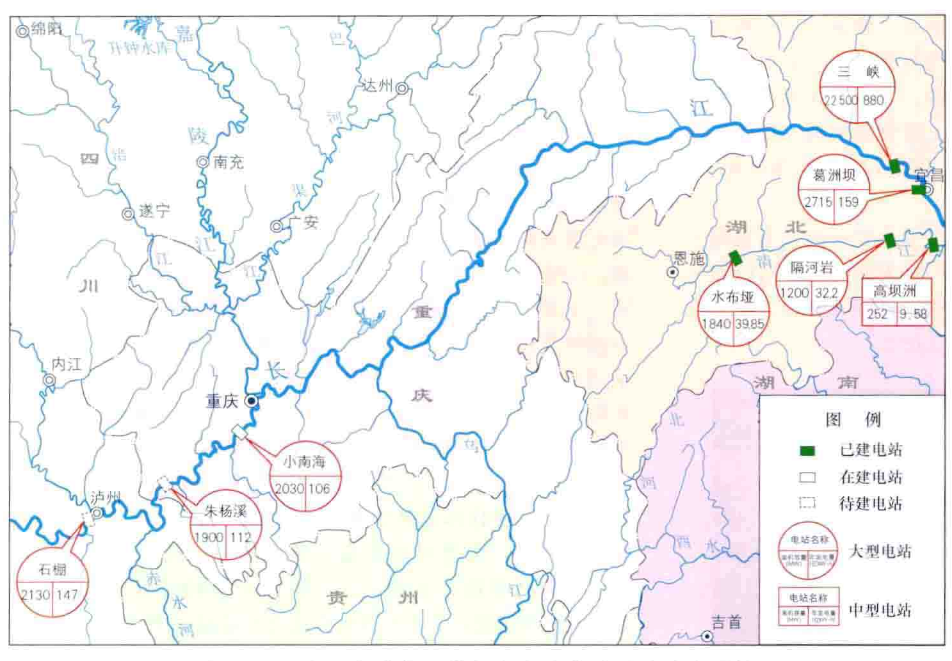
宜昌以下河段　宜昌以下长江干流为平原型河道，河长1773km，落差39m，径流量虽很丰富，但限于淹没损失难以开发利用。包括宜昌至江口长江干流、清江水系、洞庭湖水系、汉江水系、鄱阳湖水系及其他中小支流。理论蕴藏量10MW及以上的河流共574条，理论蕴藏量3849.08亿kW·h/a，占长江水系的15.8%。其中，干流761.33亿kW·h/a，占该河段总量的19.8%；支流3087.75亿kW·h/a，占该河段总量的80.2%。该河段长江干流虽有一定数量的理论蕴藏量，但无可开发量，技术可开发量全部分布在支流上。技术可开发水电站2594座，装机容量33812.8MW，多年平均年发电量1201.69亿kW·h，分别占长江水系技术可开发量的13.2%和10.1%。

该河段共有大型水电站19座，装机容量12500.0MW，多年平均年发电量374.03亿kW·h，分别占技术可开发量的37.0%和31.1%。其中，装机容量1000MW及以上的水电站4座。

清江水系流域面积1.67万km²，在湖北宜都注入长江，河口处多年平均流量421m³/s。清江干流长428km，落差1430m，水能资源理论蕴藏量215.43亿kW·h/a，干流技术可开发水电站14座，装机容量3376MW，多年平均年发电量92.90亿kW·h。

Chang Jiang (Yibin-Yichang duan) shuidian guihua

长江（宜宾—宜昌段）水电规划　[hydropower development planning of Changjiang (Yangtze) River (the Yibin-Yichang reach)]　根据1990年国务院批复的《长江流域综合规划》，在宜宾—宜昌河段安排有石硼、朱杨溪、小南海、三峡和葛洲坝5级水电站（见图）。该河段的治理与开发重点在于减免洪灾损失、利用水能发电和提高河



长江（宜宾—宜昌段）梯级水电站布置图及开发现状

1992年4月，中国第七届全国人民代表大会第五次会议通过了关于兴建长江三峡水利枢纽的决议，决定批准将兴建长江三峡水利枢纽列入国家1991～2000年国民经济和社会发展十年规划。1993年7月，国务院审查批准了长江三峡水利枢纽初步设计报告（枢纽工程）。1994年12月14日，长江三峡水利枢纽正式开工。2005年，左岸电站机组全部投产发电。2008年，右岸电站机组全部投产发电。2010年10月，三峡水库首次达到175m正常蓄水位。三峡地下电站于2012年投产发电，长江三峡水利枢纽总装机容量22 500MW。

道通航能力。

其中，长江三峡水利枢纽是为防洪、发电、航运服务的控制性工程，其水库承担主要的调节任务。葛洲坝水利枢纽的水库承担反调节任务。其余3座是径流式水电站。5座水库的总库容542.5亿m^3，其中防洪库容221.5亿m^3，兴利库容167.9亿m^3。5座水电站总装机容量30 145MW，多年平均年发电量1319亿kW·h。

长江宜宾—宜昌段又称川江，河段长1030km，落差219m，河道平均比降为0.021%。宜昌水文站以上的流域面积约100万km^2，其中在该河段汇入的支流流域面积占半数以上。宜昌水文站平均年径流量4510亿m^3，平均年输沙量5.3亿t。该河段拥有水能资源理论蕴藏量2553亿kW·h/a。

长江宜宾至重庆段流经丘陵，两岸地势较低，人口较稠密，为减少水库淹没损失，不宜建高坝大库。开发的主要任务是改善河道通航条件并结合发电。在该河段布置有石硼、朱杨溪和小南海3座枢纽。为不淹宜宾市，规划石硼水电站正常蓄水位为265m；为不淹泸州市，规划朱杨溪水电站正常蓄水位为230m；而小南海水电站正常蓄水位为195m。长江重庆至宜昌段流经峡谷，两岸山势陡峻，河谷狭窄，河床深切。开发的主要任务之一是防洪，因该河段是控制长江上游洪水的咽喉要地，控制武汉市洪水来水的2/3以上，又距重点防洪的荆江地区较近。主要任务之二是水力发电，因该河段水能资源丰富，且距川东、重庆、华中、华东电网的距离较近。主要任务之三是改善航运，建坝壅水可增大航道水深，而水库调节径流后又增大长江中下游枯水期流量。该河段最下游的葛洲坝水利枢纽已经建成，其正常蓄水位为66m，装机容量2715MW，多年平均年发电量157亿kW·h。长江三峡水利枢纽建成投产后，葛洲坝水利枢纽成为反调节水库，把长江三峡水利枢纽发电后的日内不均匀流量调节成较均匀的流量出库，以适应航运要求。

changtai hunningtuba shigong

常态混凝土坝施工 (conventional concrete dam construction) 以常态混凝土为筑坝材料修建坝的过程。主要包括施工导流与度汛、坝基开挖与处理、砂石加工与混凝土生产、大坝混凝土浇筑、接缝灌浆、温度控制与质量控制等内容，见图1。



图1 锦屏一级水电站双曲拱坝施工

施工导流与度汛 一般先采用明渠或导流隧洞将原河床水流导向下游，给大坝创造干地施工条件。由于混凝土坝施工期间坝面过水对工程造成的损失和风险较小，在对发电工期影响不大的情况下，汛期可利用坝体基坑、缺口或设置底孔、梳齿等泄水（见施工导流），故常态混凝土坝具有施工导流和施工进度安排较为灵活的特点。

坝基开挖与处理 坝基一般为岩石基础，采用预留保护层的开挖方式（见石方开挖）。坝基要求有一定的抗压强度和限定的压缩变形值，坝体要与基础接合紧密、胶结良好，因此坝基表层及风化软弱岩层应按设计要求挖除。为防止地

基渗漏和加强地基承载力，还要将断层、软弱夹层和溶岩等不良地质构造挖除并处理好。为将地基的节理、裂隙胶结起来，使坝基坚固、密实、稳定、防渗，常用固结灌浆、帷幕灌浆等基础灌浆方法处理。在软基上建混凝土坝，要解决地基侵蚀、沉陷、渗漏等问题。坝基开挖后应做好基础保护。（见岩基处理、软基处理）

砂石加工与混凝土生产 水电工程大坝一般具有混凝土工程量大、施工强度高、砂石骨料用量大的特点，对砂石骨料和混凝土的质量指标控制要求严格，其砂石骨料与混凝土生产系统是工程建设的重要设施，见图2。



图2 小湾水电站右岸砂石料加工及混凝土搅拌楼

砂石加工 砂石骨料品质对混凝土性能影响很大，砂石骨料生产系统的控制重点是骨料料源选择和加工工艺、系统布置、设备选型。应通过试验、以往工程经验优先选择骨料料源种类和加工工艺。砂石生产系统在布置上宜尽量靠近主运输线，而且满足环保要求。设备生产能力和料仓储量要满足混凝土施工需要，生产系统的设计处理能力一般按满足高峰时段的平均月需要量确定。（见施工工厂设施）

混凝土生产 对水工混凝土的要求，除了一般普通混凝土的质量要求外，在不同的坝体部位还有低热、抗渗、抗冻、抗冲耐磨等不同性能要求，故其品种与强度等级繁多。对于高坝或宽河床的长坝，往往受混凝土运输条件的限制而在不同高程或左、右岸分散布置混凝土拌和系统，有条件时，拌和系统宜尽量与砂石骨料生产系统结合布置，搅拌楼一般选择自落式搅拌机。混凝土系统容量设计要满足月最高浇筑强度，还要以最大浇筑块的小时浇筑强度复核，使铺料层的覆盖时间保持在水泥初凝时间之内，以免上、下层混凝土接合面胶结不好而出现冷缝。大坝混凝土一般应进行温度控制，为限制出机温度（混凝土由拌和机中卸出时的温度），要对混凝土原材料和拌和过程采取升温或降温措施。（见混凝土制备）

大坝混凝土浇筑 坝体混凝土浇筑包括混凝土运输、入仓振捣（见混凝土浇筑），浇筑时应重点做好坝体分层分块与施工方法选择。

坝体分层分块 为满足施工质量和坝体结构要求，坝体常分成许多坝段，各坝段又分层分块进行浇筑。分层的高度，在基础约束区内常采用1.5～2.0m，脱离约束区后常采用2.0～3.0m，也有采用更高的。纵、横缝的划分根据坝基地形、地质条件，坝体布置，坝体断面尺寸，温度应力和施工条件等因素确定。横缝间距一般为15～20m。分块沿坝段纵向的长度，要考虑混凝土浇筑能力和温度控制条件的限制，一般纵缝间距为15～30m，如混凝土浇筑能力强，又能满足混凝土温度控制要求，则可通仓浇筑，不设纵缝。浇筑块分缝方式很多，主要有错缝、纵缝（包括宽缝）及斜缝等。①错缝。多用于低重力坝，浇筑块各层的水平施工缝在同一平面上，垂直施工缝相互错开，形似砖砌体。分块面积小而数量多，可采用中、小型机械施工。施工技术要求与高坝比相对简单，但浇筑块相互制约、倒仓间隔时间长，坝体升高速度较慢。②纵缝。使用最多，适合于高坝施工。它属于柱状法浇筑，即各层的垂直施工缝都在一个垂直面上，形成独立的垂直柱体，后期进行接缝灌浆，将各柱体连成整坝段。上、下游柱体隔开距离的为宽缝，待柱体混凝土收缩到一定程度后，宽缝回填低温、低坍落度（或干硬性）混凝土，有的还要进行宽缝上、下游两个面的接缝灌浆。③斜缝。斜柱体浇筑，上、下游块的接合面呈倾向上游的斜面，必须先浇上游块再浇下游块。支墩坝支墩与面板的接缝为倾向下游的斜缝，它的情况相反，要先浇支墩后浇面板。斜缝施工比纵缝麻烦，但斜缝不一定要进行接缝灌浆。中国福建省安砂坝就采用斜缝施工，不做接缝灌浆。混凝土坝主要施工分缝形式见图3。随着水工混凝土坝施工技术的提高，如采用低热水泥、降低水泥用量、骨料预冷、加冰拌和等以降低机口和入仓温度，预埋水管通冷水降温，加强表面保护，防止气温骤降引起裂缝等混凝土预冷技术和综合温控措施的发展，以及混凝土坝施工机械的性能、效率和自动化程度的提高，大坝施工倾向于大仓面、薄层短间歇浇筑，以通仓最为先进。通仓浇筑即整坝段浇筑，不设垂直施工缝。由于不分缝，仓面准备工作量少，连续浇筑机械效率高，坝体升高速度快，同时没有纵缝灌浆问题，成为混凝土坝快速施工的一项主要措施。通仓浇筑的困难是仓面浇筑强度大，混凝土温度控制要求高。

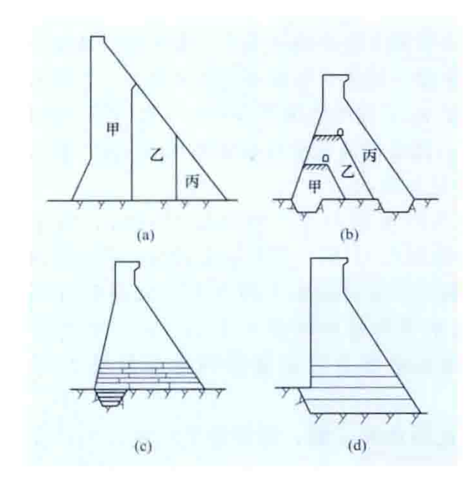


图3 混凝土坝主要施工分缝形式示意图
(a) 纵缝；(b) 斜缝；(c) 错缝；(d) 通仓

大坝混凝土施工方法 实施混凝土浇筑、器材设备吊运及金属结构安装等任务，要求其施工机械的工作范围能控制整个大坝高度和工作面。大、中型混凝土坝施工常采用缆索式起重机法、栈桥法、连续浇筑机械法和其他浇筑法等。

(1) 缆索式起重机法。大、中型混凝土坝多倾向于采用缆索式起重机（简称缆机）施工。它最有利于高坝且主坝坝身不太长的工程。缆机是一种跨河架空运输的施工机械，利用在承重索上行走的小车吊运混凝土吊罐浇筑混凝土。有固

定式缆机（两岸塔架固定不行走的）、平移式缆机（两岸主、副塔可沿各自的轨道平行走动的）、辐射式缆机（副塔为固定式塔架，主塔沿弧线行走）3 大类。缆机的主要优点是空中运输不压工作面，施工干扰少，机械投产早、撤退晚，工作灵活、速度快。主要问题是主索跨度有限制，不适于宽河床工程，要求岸边有适宜的平台场地和交通运输条件，通用性较差。大坝施工缆机布置见图 4。

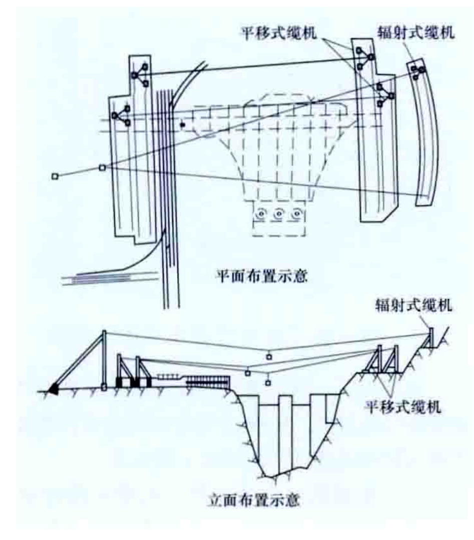


图 4　大坝施工缆机布置图

（2）栈桥法。宽河床的坝多倾向于栈桥法施工。一般是平行于坝轴线设置可行驶起重机的工作桥，桥上布置门座式或塔式等起重机。由机车或汽车运输混凝土及器材设备上栈桥或到栈桥附近供给起重机。栈桥法的主要优点是机械布置的数量多，可以多仓同时浇筑，有利于河床式电站或坝后式厂房工程施工；主要缺点是栈桥的费用较高，栈桥架设与起重机械安装压工作面，并占了大坝施工工期。对于高坝，往往要布置高、低栈桥。对于施工期坝面可能过水的工程，要考虑栈桥和施工机械的安全防护措施。

（3）连续浇筑机械法。用胶带输送机或混凝土泵等浇筑混凝土，另外配置起重安装机械承担除混凝土浇筑以外的施工任务。近代，混凝土专用胶带输送机具有浇筑速度快、生产率高的特点，它可薄层均匀铺料，平仓工作量少，同时它已基本解决了运输与卸料过程中混凝土容易离析的问题。在施工场地窄小、起重机械无法工作或混凝土供应与浇筑条件困难的部位，最适宜布置连续浇筑机械，如坝内底孔与基础处理廊道等回填混凝土时，采用混凝土泵浇筑混凝土是有效且经济的方法。

（4）其他浇筑法。对于中、小型工程，多倾向于定点布置起重机，如桅杆式起重机等，或采用无轨自行式起重机施工，如履带式及汽车式起重机等。在机械控制不到的地方，考虑辅以人工或其他措施。此外，还常用各种混凝土运输车辆，通过溜槽、溜筒等设备浇筑混凝土。

接缝灌浆　坝体混凝土在降温后体积收缩，浇筑块间接缝会张开，为连接坝的整体性，施工后期需进行接缝灌浆。灌浆时间宜选择在冬季浇筑块体积收缩、接缝张开时。为加快混凝土冷却，缩短大坝施工工期，常采取人工冷却坝体混凝土的措施。

温度控制　混凝土坝施工应进行温度控制设计，从原材料选择、配合比设计、混凝土浇筑、温升控制、表面养护与保温等方面采取综合设施。（见混凝土温度控制）

质量控制　混凝土施工过程中应进行质量检查，包括原材料、配合比、施工各主要环节及硬化后的混凝土外观与质量检查和检验。（见混凝土质量控制）

技术发展及应用　混凝土坝筑坝技术发展迅速，在混凝土生产方面，由于水泥质量的改进、高效外加剂的发展、大量掺用优质粉煤灰及其他掺合料的工艺，以及人工砂石料系统和预冷工艺的不断提高，创新了各项混凝土的质量指标，提高了施工质量和施工效率。随着施工机械不断创新，如大跨度快速缆索式起重机，大型门塔机，高效、大容量自动化拌和楼，各种操作灵便的塔式起重机、平仓振捣机、混凝土切缝机、专用混凝土胶带输送机等的出现，大大提高了混凝土坝浇筑强度。中国三峡水利枢纽工程采用二次风冷骨料以及加冰拌和等预冷工艺，拌和楼在夏季能生产 7℃ 的低温混凝土。采用塔架高 120m 的摆塔缆索式起重机、布料范围达 100m 的塔带机、最大工作幅度达 71m 的门塔机等新型设备，年最大浇筑强度达 548 万 m^3，刷新了世界纪录。

changzhai nengli

偿债能力

（solvency）　用利息备付率、偿债备付率和资产负债率等指标反映财务主体的偿还借贷的能力。如果能够得知或根据经验设定所要求的借款偿还期，可以直接计算利息备付率和偿债备付率指标；如果难以设定借款偿还期，还可先大致估算出借款偿还期，再采用适宜的方法计算出每年需要的还本和付息的金额，进而计算指标。

借款偿还期计算　首先计算还贷资金，包括发电利润、折旧费和摊销费，然后计算借款偿还期。

还贷利润＝税后发电利润－盈余公积金－应付利润

盈余公积金可按税后发电利润的 10% 提取；应付利润为企业法人每年需支付的利润，如股息、红利等。

税后发电利润＝发电收入－发电总成本费用－发电税金

发电税金＝发电所得税＋销售税金附加

还贷折旧＝折旧费×折旧还贷比例

折旧还贷比例可由企业自行确定，最高可达 100%。

摊销费用于还贷的比例同折旧。

根据清偿的需要，盈余公积金和应付利润可部分用于还贷。

借款偿还期＝借款偿还开始出现盈余年份
－开始借款年份＋当年偿还借款额
÷当年可用于还款的资金额

借款偿还方式应按各种借款的规定采用，一般有等本金偿还、等本息偿还、按能力偿还等。

等本金偿还即等额还本，利息照付。其计算公式为

$$A_t' = \frac{I_c}{n} + I_c\left(1 - \frac{t-1}{n}\right)i$$

式中 A_t' 为第 t 年的还本付息额；I_c 为建设期末固定资产借款本息和；n 为贷款方要求的借款偿还年数（由还款年开始计）；i 为年利率。

每年支付利息＝年初本金累计×年利率

$$每年偿还本金 = \frac{I_c}{n}$$

等本息偿还计算公式为

$$A = I_c \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1}$$

式中 A 为每年的还本付息额。

每年支付利息＝年初本金累计×年利率

每年偿还本金＝A－每年支付利息

利息备付率（ICR）计算　在借款偿还期内的息税前利润（$EBIT$）与应付利息（PI）的比值。它从付息资金来源的充裕度角度反映项目偿付债务利息的保障程度，按下式计算

$$ICR=\frac{EBIT}{PI}$$

式中 $EBIT$ 为息税前利润；PI 为计入总成本费用的应付利息。

利息备付率应分年计算，利息备付率高，表明利息偿付的保障程度高。利息备付率应大于 1，并结合债权人的要求确定。

偿债备付率（DSCR）计算　在借款偿还期内，用于计算还本付息的资金（$EBITDA-T_{AX}$）与应还本付息金额的比值，它表示用于还本付息的资金偿还借款本息的保障程度，按下式计算

$$DSCR=\frac{EBITDA-T_{AX}}{PD}$$

式中 $EBITDA$ 为息税前利润加折旧和摊销；T_{AX} 为企业所得税；PD 为应还本付息额，包括还本金额和计入总成本费用的全部利息。融资租赁费可视同借款偿还。运营期内非短期借款本息也应纳入计算。

如果项目在运行期内有维持营运的投资，可用于还本付息的资金应扣除维持运营的投资。

偿债备付率应分年计算，偿债备付率高，表明可用于还本付息的资金保障程度高。

偿债备付率应大于 1，并结合债权人的要求确定。

资产负债率（LOAR）计算　各期末负债总额（TL）同资产总额（TA）的比率，按下式计算

$$LOAR=\frac{TL}{TA}\times 100\%$$

式中 TL 为期末负债总额；TA 为期末资产总额。

适度的资产负债率，表明企业经营安全、稳健，具有较强的融资能力，也表明企业和债权人的风险较小。该指标应结合国家宏观经济状况、行业发展趋势、企业所处竞争环境等条件判定。

changfang cainuan tongfeng xitong

厂房采暖通风系统

（heating and ventilation system of power house）　为保证水电站主副厂房内合适的空气温度、湿度、洁净度、流速等，由供热和降温设备、风机、管道、阀门、监控设备等组成的系统。一般包含厂房采暖、厂房通风及空气调节系统。

厂房采暖　向厂房内供给热量并使厂房内保持一定的温度，保证冬季厂内各处设备的正常运行和运行人员工作必要的环境条件。主要有电辐射板采暖、热风采暖和电炉采暖等方式。

厂房通风　对水电站主、副厂房进行室内外空气交换，改善生产和生活环境条件，以保证厂内机电设备正常运行以及为值班及检修人员的健康创造必要的环境条件（包括厂内空气的温度、相对湿度、流速及新鲜空气的含量等）。分为自然通风和机械通风两种方式。

自然通风　由室外风压和室内外空气密度差造成的压差而引起的空气流动，达到室内通风换气的目的。它不需要专门的动力设施，是一种比较经济的通风方式。地面厂房的自然通风是依靠门、窗来组织厂房的进、排风。地下式厂房或坝内式厂房则利用处于较低位置的隧洞（如交通洞、无压尾水洞等）进风，利用处于厂房较高位置的隧洞（如出线洞等）排风。图 1 为地下式厂房自然通风系统透视图。

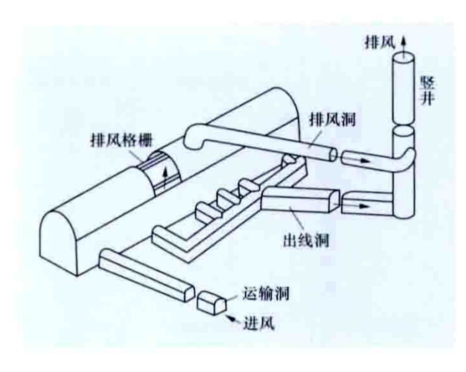


图 1　地下式厂房自然通风系统透视图

机械通风　依靠通风机造成的压力使空气流动，达到室内通风换气的目的。机械通风有机械送风自然排风、机械排风自然进风和机械送风机械排风 3 种形式。

（1）机械送风自然排风。利用风机将室外空气升压后送入室内，在室内进行热、湿交换后依靠余压排到室外，达到通风换气的目的。

（2）机械排风自然进风。室内空气利用风机升压后排到室外，室外的新鲜空气经过门窗、孔洞等进入室内，形成室内的通风换气过程。图 2 为地下式厂房机械排风自然进风系统透视图。

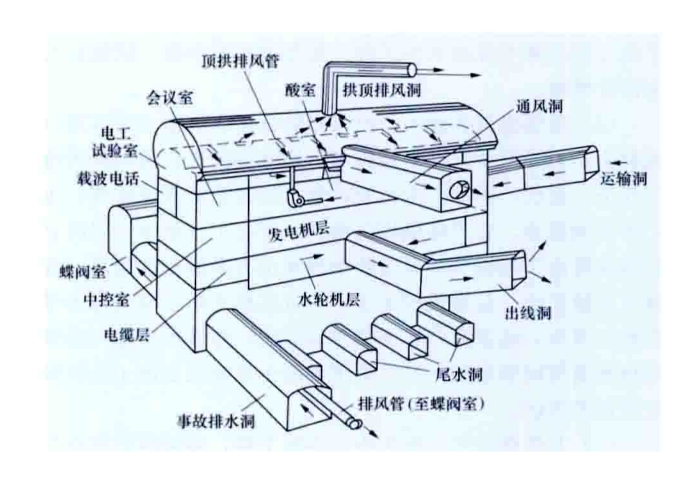


图 2　地下式厂房机械排风自然进风系统透视图

（3）机械送风机械排风。利用风机将室外新鲜空气送入室内，经过热、湿交换后的室内空气再用风机排到室外。

通风要求　不同的场所对通风有不同的要求：

（1）主厂房的发电机层、母线室（道）、配电装置室、变压器室等处的通风主要是排除室内余热，防止夏季空气温度过高而影响设备的正常运行和人员的工作。

（2）主厂房的进口阀层（室）、水轮机层、水泵室等处的通风主要是排除室内的潮湿空气，以防止空气相对湿度过高，造成设备锈蚀、电气设备绝缘下降等。

（3）GIS 室、蓄电池室、油罐室、油处理室等处的通风

主要是排除室内设备在生产过程中产生的有害气体，一般设置独立的排风设施。

(4) 中央控制室、电子计算机室、通信室等处的通风主要满足设备对环境温度、相对湿度及空气中灰尘允许浓度的要求，并应考虑工作人员的健康与舒适。

空气调节 采用制冷机、冷水机组、加温设备、组合空调等设备，将外界的、室内抽出的或者是混合空气经过除湿、加温或降温、除尘、杀菌等处理后送入室内，用以对房间进行加温或降温及其他空气参数的调整。当水电站厂房采用地下布置方式或电站所处区域夏季较热，部分房间仅靠自然通风和机械通风不能满足设备的降温要求和运行人员正常工作的要求时，通常采取空气调节措施。

为降低厂房及某些部位的空气湿度而配置的设备及其管路统称厂房除湿系统。对于潮湿地区或厂房较低部位，运行时较大的湿度给运行人员及设备的正常运行带来不利影响，为降低空气中的湿度，需要配置除湿机等。

chenshachi

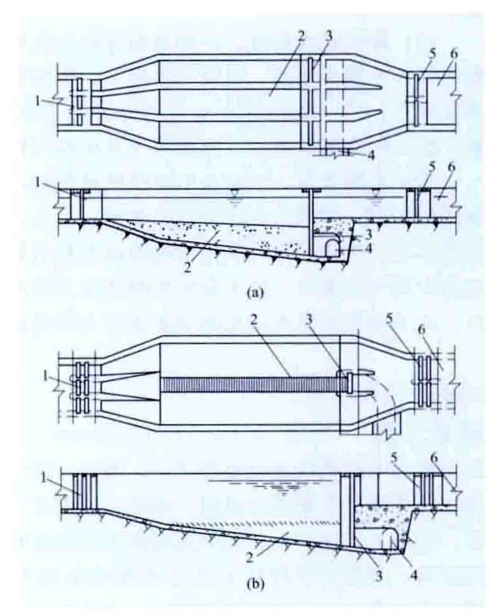
沉沙池 (sedimentation basin)

用以沉淀进入引水道泥沙的水工建筑物。设于进水口下游，或渠道的适当位置，是多泥沙河流上开敞式进水口用以防治泥沙的主要设施。开敞式进水口的上游一般无沉积泥沙的足够库容，河中来水虽经设在进水口前的拦沙坎拦截了大量的推移质，但悬浮质和少量的粗颗粒泥沙仍会通过进水口流入引水道。如果对这些泥沙不作有效处理，部分较粗颗粒泥沙有可能淤积在渠道中，使过水断面减少、引水流量受阻，部分泥沙还将会随水流进入水轮机，造成水轮机磨损，水流流态恶化，效率降低，缩短水轮机转轮使用寿命。因此，需要在进水口后或渠道的适当位置设置沉沙池。沉沙池要有足够的断面和长度，水流进入沉沙池后流速会显著降低，使得水流中所挟带的泥沙逐步沉淀在沉沙池内，经沉淀后的清水继续流入引水管道，沉淀在池内的泥沙由冲沙廊道排出。

沉沙池的设置需考虑通过水轮机的泥沙特性及其对水轮机的磨损程度、机组运行检修要求、沉沙池造价等因素，经技术经济比较后确定。沉沙池的设计最小沉降颗粒与水轮机额定水头有关，一般额定水头为100～400m时，设计最小沉降颗粒粒径取0.25mm；额定水头为25～100m时，取0.35mm。沉沙池可分为定期冲沙池和连续冲沙池两类。

定期冲沙池　沉沙与冲沙交替进行的沉沙池。主要由上游连接段，工作段，下游连接段，冲沙廊道和进、出口闸等组成，见图(a)。进口与出口上、下游连接段分别与沉沙池的进、出口引水道相接，一般做成逐渐扩散或逐渐收缩的型式，使流入和流出的水流得以均匀扩散和收缩，避免发生不利的流态而影响沉沙效果。为了缩短扩散段的长度，可通过水工水力学模型试验在其中设置配水墩和整流栅，强制挟带泥沙的水流均匀扩散，根据电站引用流量的大小和运行要求，选用单室或多室的沉沙池。沉沙池内的流速根据沉降泥沙最小粒径的要求选择。沉沙池的断面尺寸根据引用流量的大小和预留的沉沙容积确定。为使有害泥沙颗粒在流动中有足够的时间逐渐沉淀下来，沉沙池要有足够的长度。

当泥沙淤满沉沙池的预留容积后，池中流速将会增大，有可能将有害颗粒带至下游引水道内，此时需开启排沙廊道进行排沙。具体操作步骤为：①关闭沉沙池的进、出口闸门，暂时停止向下游引水道内供水；②开启冲沙廊道的闸门，利用池内外水头差快速放空池内含沙积水，使部分泥沙排出池外；③局部开启进口闸，利用闸门下的压力水流将池内沉沙冲起，由冲沙廊道排出池外。当池内泥沙被排除干净后，关闭排沙廊道闸门，同时开启沉沙池进、出口闸的闸门，恢复向下游引水道供水。若为多室沉沙池，可在不停止向引水道供水的情况下，定期分室轮流冲沙。除利用水力冲沙方法外，还可在沉沙池内设置吸泥船，用大功率吸泥泵抽排淤沙，而不必设置出口闸和冲沙廊道。



沉沙池示意图

(a) 定期冲沙池；(b) 连续冲沙池

1—进口闸；2—积沙池；3—闸门；4—冲沙廊道；5—引水闸；6—引水道

连续冲沙池　在连续供水的同时，将沉落的泥沙连续不断地排入下游河道的沉沙池。将沿沉沙池的纵向底板做成连续的漏斗，在其下方设置小断面的进沙孔以及冲沙支廊道和主廊道，见图(b)。

当水流通过沉沙池时，在廊道内形成流速较大的压力流。因此，在流速较低的沉沙池中沉淀下来的泥沙能通过进沙孔进入廊道，再随压力水流排出池外。这种沉沙池可不设闸，不停水、不中断发电，但连续排沙耗水量较大，适用于来水流量大于被引用流量的河流。

chengyashui

承压水 (confined water)

充满于上、下隔水层之间承受一定压力的地下水。当井(孔)揭穿上部隔水层后，地下水即上升至含水层顶板以上某一高度，其稳定水位即为承压水位。当承压水位高出井(孔)口时，就成为自流井。有的承压含水层被沟谷揭露后，就会自流溢出地面，称为自流水。承压水的形成主要取决于地质构造，在适当的地质构造条件下，无论是孔隙水、裂隙水或岩溶水均可形成承压水。承压水的水质变化很大，可以从淡水到含盐量很高的卤水。承压水有向斜蓄水构造、单斜蓄水构造及脉状蓄水构造3类蓄水构造类型。

(1) 向斜蓄水构造。又称自流盆地，可以划分为补给区、承压区及排泄区。

(2) 单斜蓄水构造。又称自流斜地，由于岩性相变或断

层切割所致，补给的水在深部无排泄出路而回流于补给区附近排泄。若断层导水性好，承压水可通过断层以上升泉形式排泄于地面。

（3）脉状蓄水构造。一类是由分布于高处的裂隙岩体吸收大气降水或地表水，在重力作用下，使深部的裂隙水具有承压性质；另一类是由于岩石圈深处上升的气体压力所造成，如沿深大断裂或侵入接触带上升的高气化热水。

承压水的水位、水量及水质受气候影响不显著，一般不易受到污染，常成为良好的供水水源。但是，承压水往往会给采矿或工程建设带来严重的威胁或不利的影响，水电工程建设中要考虑基坑、地下洞室等的承压水涌水、顶托的可能性，以及裂隙承压水引起的坝基扬压力的增高。

chengzhen qianjian

城镇迁建 (city and town relocation) 对受工程建设征地影响的城镇进行重新选址、规划、设计、建设，直至移民妥善搬迁安置的全过程。通常，城镇是其所辖区域的政治、经济、文化中心，如果其建成区全部受到水库建设征地的影响，而建设征地后对其经济腹地影响不大，应首选迁建。城镇迁建包括城镇迁建选址、城镇迁建总体规划、城镇迁建修建性详细规划、城镇基础设施及房屋的设计和建设、城镇移民安置实施等工作。

城镇迁建首先应进行城镇迁建选址，须选择具有适宜的地形、地质、水源条件以及地理位置恰当的城镇新址，并针对选定的新址编制城镇迁建总体规划和城镇迁建修建性详细规划。遵照审定的迁建规划，对水、电、道路等基础设施和学校、医院、行政办公设施、市场等公共设施，以及移民安置房等进行设计和建设。

城镇迁建选址 通过多方案比较，确定城镇搬迁新址的过程。在进行城镇迁建新址选择时，在节约用地、不占或少占耕地的前提下，进行多个方案的比较，选择地理位置和地形、地质条件较好，交通方便，水源充足，水质条件良好，便于排水的地段，避开山洪、滑坡、泥石流等自然灾害影响的地段和已探明有开采价值的地下资源或重要历史遗迹分布的地段。城镇迁建新址的选择应进行必要的环境影响评价、水文地质和工程地质勘察，以及地质灾害危险性评估。

城镇迁建选址分为新址初选和新址确定两个阶段。在预可行性研究阶段，迁建城镇的人民政府在综合考虑各方面意见的基础上，提出2～3个可能的迁建新址供比选，由水电工程移民安置规划编制单位牵头，组织有关方面，从地理位置、工程地质条件、工程费用、建设周期、移民的认可程度等多方面对备选的新址进行比较分析，并在征求上一级人民政府意见的基础上提出新址初选方案。在可行性研究阶段，城镇迁建新址由迁建城镇人民政府在上一阶段初选的基础上，征求有关方面的意见后进行确认。水电工程移民安置规划编制单位编制新址选择专题报告，明确推荐新址方案，由迁建城镇人民政府按国家规定的程序完成新址的报批手续。

城镇迁建总体规划 以移民安置总体规划确定的城镇迁建人口规模为基础，依据国民经济和社会发展规划以及当地的自然环境、资源条件、历史情况、现状特点，为确定迁建城镇的性质、规模和发展方向，实现迁建城镇的经济和社会发展目标，合理利用建设土地，协调迁建城镇空间布局等所作的一定期限内的综合部署和具体安排。

城镇迁建人口规模是指规划水平年需搬迁进入城镇安置的移民人口数量。城镇迁建人口规模需要在迁建基准年移民人口规模的基础上，按人口的自然增长率和机械增长率进行预测。迁建基准年移民人口包括：①原址建设征地范围内须随城镇迁移的移民人口；②原址建设征地范围以外必须随城镇迁移的移民人口；③新址征地拆迁并经移民安置规划确定进入城镇安置的移民人口；④移民安置规划确定迁入城镇原址外迁入新址的移民人口；⑤城镇搬迁必须迁往新址的寄住人口。

城镇迁建总体规划的主要任务是：以淹没实物指标为基础，参照国家有关规程规范和标准合理确定道路、给水、电力、电信、排水等市政工程标准；按照规划水平年城镇的移民人口规模编制近期建设规划，合理安排满足移民搬迁安置各项建设用地的总体布局。

城镇迁建修建性详细规划 依据城镇迁建总体规划，直接对规划水平年移民安置需要的所有建设项目作出具体、细致的安排，制订用以指导移民搬迁安置需要的各项建筑和工程设施设计和施工的规划设计。

编制城镇迁建修建性详细规划的主要任务是：直接对规划水平年移民安置需要的住宅与学校、医院、行政办公、市场等公共建筑作出具体的安排和场地初步设计，为移民安置实施阶段的建筑、园林和市政工程施工图设计提供依据。

城镇基础设施及房屋的设计和建设 城镇基础设施包括道路、给排水、电力、电信、广播、电视、供热、燃气、绿化等；对于城镇基础设施和城镇内规划的房屋，需要有相应行业资质的规划设计单位开展相应的单项设计，并按照设计成果进行建设。

城镇移民安置实施 主要由地方及其职能部门负责组织实施，项目业主参与，设计单位进行技术配合。对于城镇基础设施和需要由政府统一建设的房屋，由地方委托单项设计单位对各个建设项目进行施工图设计，按照建设项目招投标和工程监理制度的相关规定，组织各个工程项目的实施，并接受移民综合监理的监督。对于移民私有房屋，根据移民的意愿可由移民负责建设。

chongjishi shuilunji

冲击式水轮机 (impulse turbine; Pelton turbine) 只利用水流动能做功，将水流的能量转换为旋转机械能的水轮机。又称佩尔顿水轮机。按水流冲击转轮的部位和方向区分，冲击式水轮机可分为水斗式、斜击式和双击式；按水轮机轴的布置方式分，可分为卧式和立式。斜击式和双击式水轮机由于效率低、使用水头有限，只用于小型水电站。水斗式水轮机应用最为广泛，是冲击式水轮机中最具有代表性的机型，其使用水头范围一般在300～1700m。

水斗式水轮机 又称切击式水轮机。主要部件有：输水管（又称配水环），为引水部件；喷流机构，包括喷嘴、喷针及其控制机构，用以调节流量和功率；转轮，由轮盘和沿其圆周均匀布置的水斗式轮叶组成；折向器（又称偏流器），

用以在负荷骤减时减少或切断射到转轮上的水流，协调引水系统水锤压力和机组转速升高的矛盾。水斗式水轮机的结构见图1，转轮结构见图2。

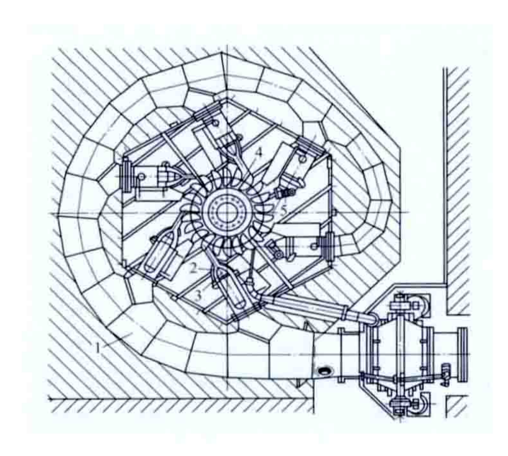


图1 水斗式水轮机结构图

1—输水管；2—喷嘴；3—喷针；4—转轮；5—折向器

斜击式水轮机 喷嘴的射流方向不在转轮的旋转平面上，而是成某一角度（α），此角一般为22°～25°，见图3。斜击式水轮机的适用水头一般在400m以下，转轮结构比较简单，多用于中小型水电站。

双击式水轮机 水流两次冲击叶片，首先从转轮外周进入部分叶片流道，然后从内周再次冲击部分叶片，首次冲击利用70%～80%的动能，第二次冲击利用动能的20%～30%，见图4。双击式水轮机应用水头为10～150m，只适用于小型水电站。

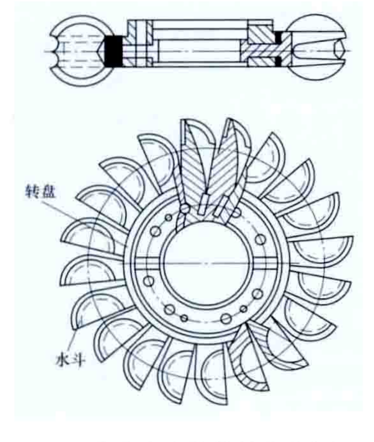


图2 水斗式水轮机转轮结构图

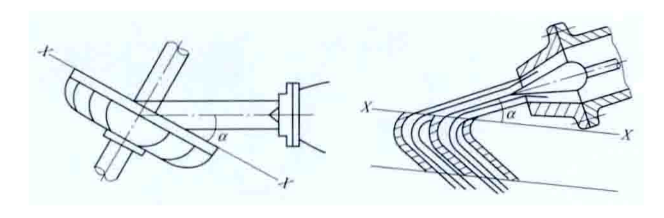


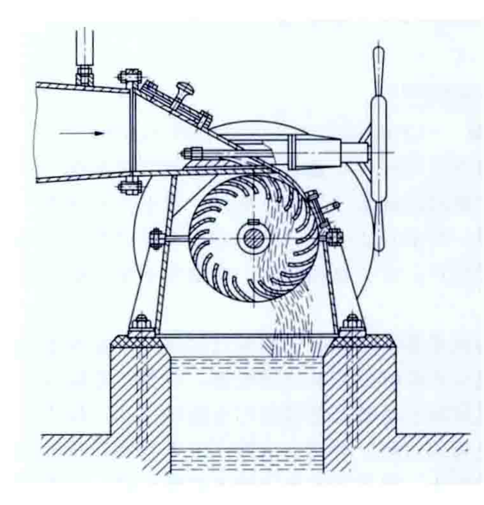
图3 斜击式水轮机射流斜击转轮示意图

发展简史与趋势 1880年，美国人L.A.佩尔顿（L.A.Pelton，1829—1908）首次提出一种双曲面型水斗式水轮机。

随着水轮机技术的进步，冲击式水轮机的应用日益广泛。其使用水头已达1000m以上，喷嘴的数量也随之增加，大型水斗式水轮机的喷嘴数已达6个之多。发展趋势是提高单个喷嘴的比转速和继续增加喷嘴的数量，以适应高水头、更大容量电站的需要。

使用大型水斗式水轮机最多的是欧洲。世界上单机容量最大的冲击式机组位于瑞士的Bieudron电站，机组额定功率420MW，其使用水头也最高，达1883m；转轮直径最大的冲击式水轮机位于奥地利基利茨电站，转轮节圆直径5.5m。

中国采用冲击式水轮机较少。在已投入运行的、采用水斗式水轮机的水电站中，单机功率最大的为金窝水电站，机组单机额定功率为140MW，每台机组6个喷嘴，最大水头619.8m，额定水头595m，最小水头594.3m；应用水头最高的是天湖水电站，额定水头1022.4m，每台机组2个喷嘴，单机额定功率15MW。


图4 双击式水轮机示意图

chongshazha

冲沙闸 （scouring sluice） 用以排除沉积在进水口前的淤沙，以保证进水口“门前清”的水工建筑物。常规的布置方式是冲沙闸紧靠进水口设置，与河床泄洪闸或溢流坝等组成挡水建筑物。

冲沙闸在结构上与其他水闸基本相同，只是使用目的不同。设置冲沙闸的目的主要是排沙，尤其是排除沉积在进水口前大粒径的推移质泥沙，所以闸门以下底板和侧壁应具有较高的抗冲耐磨性能。为了保护闸基的安全，通常在其下游设有护坦、海漫和护岸工程。

在满足进水口有足够的引用流量的情况下，冲沙闸可根据需要随时开启冲沙，一般多在洪水期使用。此时冲沙既有足够的冲沙流量，又可获得良好的冲沙效果，同时也可兼顾泄洪，一举多得。

冲沙闸的底板高程根据工程所在地的地形、地质条件，坝前水位，进水口高程而定，底板过高，不利于冲沙，而且会冲刷下游河床；底板过低，又易使下游河床淤积。一般情况下，冲沙闸的底板高程应低于电站进水口高程，并以枯水期河床的平均高程为宜。

chongxiezhi

冲泻质 （wash load） 水流输移的泥沙中不参与造床的部分。又称非造床质。主要以浮游的形式存在于水流层，自河底至水面，单位水体中含量相差甚微，在床面层中为数极少，当河段出现冲刷现象时，不可能由床面层得到充分补给。冲泻质在水流中的含量主要取决于上游的供应条件，与水流条件的关系不明显。冲泻质是河漫滩沉积物的主要组成部分，其输沙率对水库的淤积速度起主要作用。

见床沙质。

参考书目

张瑞瑾，谢鉴衡．河流泥沙动力学．北京：水利电力出版社，1989.

chongfu rongliang

重复容量 (duplicate capacity) 见装机容量。

chonshui xuneng dianzhan

抽水蓄能电站 (pumped storage power station)

利用电力系统低谷负荷时的价值低电力抽水到高处蓄存，在价值高的高峰负荷时段放水发电的水电站。是电力系统唯一的填谷调峰电源。在负荷低谷时，吸收电力系统的有功功率抽水，这时它是用户；在负荷高峰时，向电力系统送电，这时它是发电厂。

图1所示为抽水蓄能电站日、周运行过程。常规水电机组和燃气轮机组也是调峰性能较好的电源，但都没有填谷作用。抽水蓄能电站抽水是把电能转换为水能的过程，发电是把水能转换为电能的过程。在每一次抽水发电的能量转换循环中，都有能量损失，使发电量小于抽水的耗电量，两者之比是抽水蓄能电站循环效率，或称抽水蓄能电站综合效率，一般为0.7～0.8。抽水蓄能电站与火电、核电、风电等配合运行，因其调峰、填谷和承担旋转备用的作用，可节省火电机组因降低出力运行的高燃料消耗和机组起停的额外燃料消耗，减少火电机组开停机次数，使核电站平稳运行，因而延长火电和核电机组运行寿命。抽水蓄能电站有起停灵活、增减工作出力快的优点，从空载到满载只需30～35s，从静止到满载发电需2～3min，从静止到满载抽水需5～6min，从满载发电或满载抽水到与电网解列约1min，因其快速反应能力，适宜承担电力系统紧急事故备用，成为电力系统的保安电源。此外，抽水蓄能电站还可承担电力系统的调频、调相、黑起动等任务。抽水蓄能电站造价不高，根据电力系统负荷、电源的分布情况，合理布置抽水蓄能电站，可减小电网潮流，在节省电网建设费用的同时减少网损，在降低系统事故率、提高供电可靠性的同时，节省电力系统总费用。在以火电、核电为主，风电等新能源比重较高，缺乏常规水电的电力系统中，修建适当比例的抽水蓄能电站作为电力系统的保安电源是必需的。

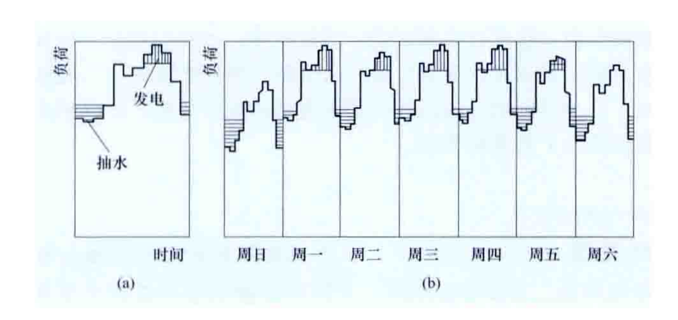


图1 抽水蓄能电站运行过程图

(a) 日运行；(b) 周运行

类型 可按开发方式、水库调节周期分类。

按开发方式分类 可分为纯抽水蓄能电站、混合式抽水蓄能电站和调水式抽水蓄能电站3类。

(1) 纯抽水蓄能电站。发电量绝大部分来自抽水蓄存的水能。发电的水量基本上等于抽水蓄存的水量，重复循环使用。仅需少量天然径流，补充蒸发和渗漏损失。补充水量既可来自上水库的天然径流来源，也可来自下水库的天然径流来源。如美国的勒丁顿抽水蓄能电站，装机容量1872MW，其上水库在密执安湖东岸不远处的山顶上，用高52m、长9.6km的土堤围成，下水库为密执安湖。纯抽水蓄能电站原理见图2(a)。

(2) 混合式抽水蓄能电站。厂内既设有抽水蓄能机组，也设有常规水轮发电机组。上水库有天然径流来源，既可利用天然径流发电，也可从下水库抽水蓄能发电。其上水库一般建于河流上，下水库按抽水蓄能需要的容积觅址另建。如中国的潘家口抽水蓄能电站，装机容量420MW，装有1台单机容量为150MW的常规机组和3台单机容量为90MW的抽水蓄能机组，多年平均年发电量6.2亿kW·h，其中3.89亿kW·h为天然径流发电量，2.31亿kW·h为抽水蓄能发电量。混合式抽水蓄能电站原理见图2(b)。

(3) 调水式抽水蓄能电站。上水库建于分水岭高程较高的地方。在分水岭某一侧拦截河流建下水库，并设水泵站抽水到上水库。在分水岭另一侧的河流设常规水电站从上水库引水发电，尾水流入水面高程最低的河流。调水式抽水蓄能电站原理见图2(c)。这种抽水蓄能电站的特点是：①下水库有天然径流来源，上水库没有天然径流来源。②调峰发电量往往大于填谷的耗电量。如中国湖南省慈利县慈利跨流域抽水蓄能工程，见图3。在沅江支流白洋河上源渠溶溪设水泵站引水至赵家垭水库，年抽水1670万m^3。赵家垭水库后设3级水电站共12 300kW，尾水流入澧水支流零溪河。该项工程多年平均年抽水用电量340万kW·h，多年平均年发电量1390万kW·h。

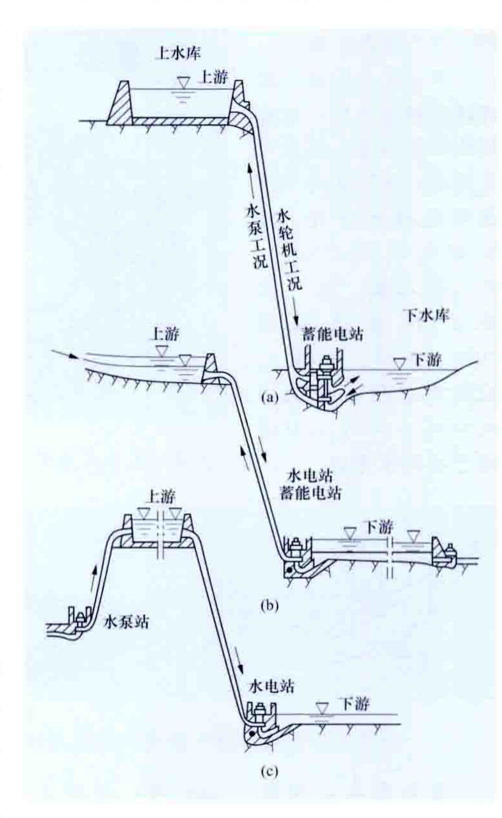


图2 抽水蓄能电站类型图

(a) 纯抽水蓄能；(b) 混合式；(c) 调水式

按水库调节周期分类 可分为日调节、周调节和年调节3类。日、周调节抽水蓄能电站的运行方式见图1，这类电站大多为纯抽水蓄能电站。年调节抽水蓄能电站的运行方式为：在汛期多抽水、少发电，在枯水期多发电、少抽水。

电站组成 抽水蓄能电站主要由上水库、下水库、输水系统、厂房、开关站等部分组成。

上水库和下水库 上水库的高程高于下水库，其作用在

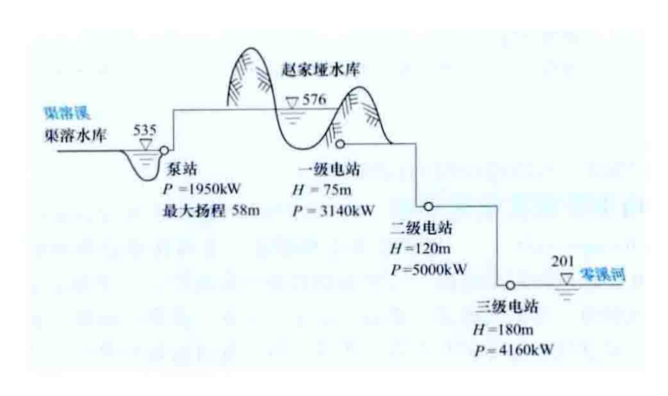


图 3　慈利跨流域抽水蓄能工程剖面示意图

于把提高了高程的水体蓄存起来，达到蓄能的目的。上水库可以利用已建水库或天然湖泊，也可新建。下水库的作用在于蓄存发电下放的水量，不使流失，以便再度将其泵入上水库进行蓄能。下水库除可利用已建水库、天然湖泊或新建外，也有利用海洋或河道作下水库的情况。中国台湾省的明湖抽水蓄能电站和明潭抽水蓄能电站都是利用天然湖泊日月潭作为上水库。英国狄诺维克抽水蓄能电站的上、下水库都是筑坝壅高天然湖泊水位形成的。

上、下水库间的高程差越大，电站水头越高，对同等规模的电站而言，所需水库库容越小，流量越小，水工建筑物的工程量相应减小，造价降低，机组设备的投资也有所降低。上、下水库间的输水道（包括上游引水道和下游尾水道）越短，则输水系统工程量和水头损失越小，工程造价和运行费用都会降低。可用输水道长度（L）与水头（H）之比来粗略衡量其经济性，许多抽水蓄能电站的 L/H 都小于10。对于新建的上水库或下水库，防渗漏是一个重要问题，需妥善处理（见库盆防渗）。

输水系统　包括两部分：在上水库和厂房之间的为引水部分，在厂房和下水库之间的为尾水部分。引水部分包括进（出）水口、引水道，引水道长度较长时，须设引水调压室。引水道和调压室的构造均与常规水电站相同。进（出）水口，发电时为进水口，抽水时为出水口，应按双向水流设计，既要防止出流时流速过大，分布不匀，引起拦污栅振动破坏，又要防止进流时产生吸气漩涡。压力管道的岔管，也要考虑双向水流，使水头损失最小。尾水部分如果较长，须设尾水调压室，其进（出）水口也应按双向水流设计。

厂房　抽水蓄能电站的厂房有地面厂房和地下厂房。由于水泵和可逆式机组的吸出高度为较大的负值，一般可达−70～−25m，因而多数大中型纯抽水蓄能电站都是地下厂房。混合式抽水蓄能电站装有两种机组，抽水蓄能机组的安装高程低于常规机组很多，故布置上较为复杂。也有把抽水蓄能机组和常规机组分别布置在两个厂房里的，如法国的大屋抽水蓄能电站把4台常规机组布置在地面厂房内，把8台可逆式机组布置在地下厂房内。

抽水蓄能电站机组分为四机式、三机式、二机式。四机式机组分设两套机组，一套由水泵和电动机组成，供抽水用；另一套由水轮机和发电机组成，供发电用。早期抽水蓄能电站多用这种机组。在常规水电站加装水泵（见蓄能泵）抽水蓄能也属于这种方式。三机式机组，安装由同轴水泵、水轮机和发电电动机组成的机组。二机式机组，安装的机组由水泵水轮机和发电电动机同轴组成，也称可逆式机组。正向运行发电，反向运行抽水。纯抽水蓄能电站多用二机式或三机式机组。

开关站　抽水蓄能电站一般具有距负荷中心近的特点。俄罗斯扎戈尔斯克抽水蓄能电站，总装机容量1200MW，用500kV超高压输电线路接入莫斯科地区电力系统，所需线路长度只有15km。中国广州抽水蓄能电站，一期装机1200MW，距广州90km，用2回500kV输电线路接入系统。超高压开关站一般为屋外式或气体绝缘金属封闭电器。

简史　世界上最早的抽水蓄能电站是瑞士苏黎世的奈特拉抽水蓄能电站，建于1882年。该电站抽水扬程153m，容量515kW，是一座年调节抽水蓄能电站。20世纪50年代以后，随着核电站和大容量火电机组大批投产，为提高电力系统电源的调峰能力和减少调峰费用，兴建了许多抽水蓄能电站。1950年世界各国抽水蓄能电站装机容量总计1600MW，1960年为3420MW，1970年为16 640MW，1980年为46 520MW，1990年为80 680MW，每10年内的平均年递增率分别为7.89%、17.14%、10.8%和10.6%。1990年以后新增的抽水蓄能电站主要分布在亚洲国家。电站的技术水平也不断提高。机组由四机式发展到二机式（可逆式）。单级混流式水泵水轮机组可适用的水头逐渐增大，如日本葛野川抽水蓄能电站的单级混流可逆式机组的抽水扬程已达778m，发电最大水头728m。该电站单机最大输出功率412MW。利用水头最高的是奥地利的赖斯采克（Reiszeek）抽水蓄能电站，采用四机式机组，水头1773m。单站规模也不断增大。20世纪80年代单站规模最大的是美国的巴斯康蒂抽水蓄能电站，装机容量6×350MW。中国广州抽水蓄能电站一期、二期合计总装机2400MW，为单站最大的抽水蓄能电站。截至2010年，全世界抽水蓄能电站装机容量约135 000MW。

中国抽水蓄能电站建设起步较晚。1968年在岗南水库安装了第一台斜流可逆式机组，由日本制造，单机容量11MW。1975年在密云水库安装了2台中国制造的单机容量11MW的可逆式机组，转轮直径2.5m，最大水头64m。1989年潘家口抽水蓄能电站的第一台机组投产，单机容量90MW。全电站共安装3台可逆式机组和1台单机容量150MW的水轮发电机组。随着广州抽水蓄能电站（8×300MW）、十三陵抽水蓄能电站（4×200MW）和天荒坪抽水蓄能电站（6×300MW）等大型抽水蓄能电站的投产发电，到2011年底，中国大陆已建、在建抽水蓄能电站总装机容量为30 000MW。台湾省已投运的有明湖抽水蓄能电站（4×250MW）和明潭抽水蓄能电站（6×267MW）。

choushui xuneng dianzhan yunxing fangshi

抽水蓄能电站运行方式　（operation mode of pumped storage power station）　抽水蓄能电站采用兼具电动水泵和水轮发电机功能的可逆式机组，运行方式包括抽水、发电、发电方向调相和抽水方向调相等。

抽水运行方式　在电网负荷低谷时，利用电力系统富余的电力将低处（下水库）的水抽到高处（上水库），将电能转换成水的势能存储起来。抽水起动主要采用静止变频器（static frequency convertor，SFC）拖动和背靠背拖动两种起

动方式。静止变频器或拖动机通过起动母线给抽水起动机组的定子提供频率逐渐上升的电流，使定子产生频率逐步上升的旋转磁场，带动转子同步升速。

发电运行方式　在电网尖峰负荷或电力系统因事故而发电容量不足时，通过水轮发电机将储存在高处（上水库）的水的势能转换成电能送回电网。

发电方向调相和抽水方向调相运行方式　机组在发电或抽水运行时，通过关进水阀、关导叶和压水等操作，使水泵水轮机转轮在空气中运行，再凭借励磁调节作用，向电力系统输出或吸收无功功率，从而调节电网电压。

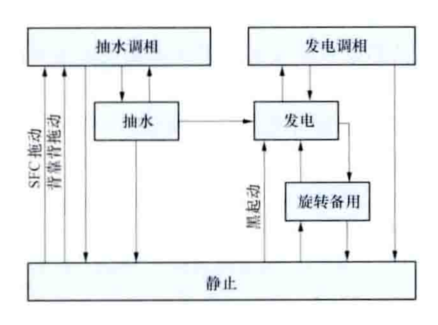


图 1　抽水蓄能电站机组运行方式转换流程示意图

抽水蓄能电站机组运行方式转换流程如图 1 所示。

与其他类型发电方式在运行特性方面比较，抽水蓄能电站机组是起动升负荷速度最快、调峰能力最强、唯一具有填谷功能的电源类型，见表和图 2。

各类发电方式运行特性比较

项　目	抽水蓄能电站	单循环燃气轮机	联合循环燃气轮机	常规水电站	燃煤火电厂	
					降负荷	起停
所承担负荷位置	峰荷	峰荷	峰(基)荷	峰(基)荷	峰(基)荷	峰荷
最大调峰能力(%)	200	100	85	100	50	100
开启(每日开启)	√	√	√	√		√
静止至满载开启时间(min)	1.5	3	60	2		
填谷	√					
调频	√	√	√	√	√	
调相	√	√	√	√	√	
旋转备用	√	√	√	√	√	
快速增荷	√	√	√	√		
黑起动	√	√		√		

注：√表示具有该项功能。

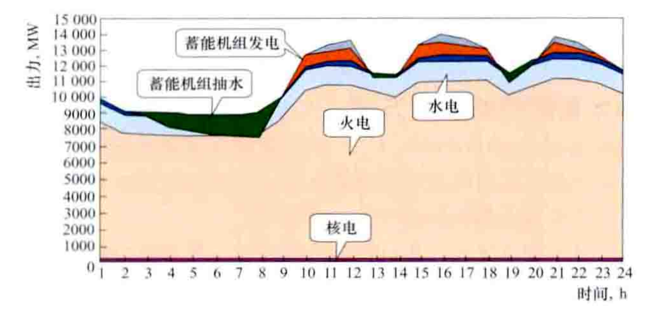


图 2　典型抽水蓄能电站调峰填谷效果示意图

参考书目

梅祖彦，赵士和．抽水蓄能电站百问．北京：中国电力出版社，2002.

choushui xuneng fadian-diandongji

抽水蓄能发电电动机　(generator/motor of pumped storage unit)　既可作发电机发电，又可作电动机带动水泵抽水的同步电机。发电电动机性能应兼顾发电机和电动机两种工况运行要求，要适应发电、抽水、调频、调相、进相和事故备用等运行工况及各种运行工况间转换的要求，且工况转换快速而频繁，通常每天起停 2～5 次。

结构性能特点　包括：①起停频繁。结构上承受的电磁作用力、机械应力及交变热应力的变幅都较大，要求机组具有足够的强度、刚度和耐疲劳强度。②工况转换多，过程复杂。需设置专用的起动设备，早期采用降压、同轴小电机、背靠背等起动，后基本采用静止变频装置起动和背靠背起动。③发电电动机要适应正、反两个方向旋转的运行要求。要求推力轴承在两个旋转方向具有相同的特性，润滑油的供应和循环也要考虑双向工作需要。通风冷却系统也要考虑适应正、反两个方向旋转的特性。④发电电动机转速一般较高，飞轮力矩较小，定子铁芯较长。⑤为提高电机的材料利用率，降低造价，设计时尽量使发电容量与抽水功率相接近。⑥在电站水头（扬程）变幅范围较大的条件下，发电电动机一般采取变极变速、双转子双定子变速、定子侧变频变速、转子变频交流励磁变速等，以适应变速运行需要。为扩大水泵水轮机运行工况下高效率的工作区，避免尾水管脉动和空蚀恶化。

简史　世界上第一座抽水蓄能电站于 1882 年诞生在瑞士。早期抽水蓄能电站使用的是独立工作的水泵电动机和水轮发电机组，后来将水泵、水轮机与一台兼作电动机的发电机连接在一起，形成三机式机组，出现了发电电动机，在两种工况下具有不同的旋转方向。国际上从 20 世纪 60 年代后期开始研制变速抽水蓄能机组。随着电力电子技术的发展，变频调速技术已应用在抽水蓄能机组上，设计制造出单机容量为 475MV·A、转速为480～520r/min 级的变速机组，于 2014 年在日本葛野川抽水蓄能电站投运。2005 年投入运行的最大的发电电动机，单机额定容量达到 525MV·A，安装于日本神流川抽水蓄能电站。

中国抽水蓄能电站建设起步较晚，第一台发电电动机于 1968 年投入运行，额定容量为 15MV·A，装在河北岗南抽水蓄能电站。20 世纪 90 年代中国抽水蓄能电站建设进入第一个高潮，广州（8×300MW）、十三陵（4×200MW）和天荒坪（6×300MW）等电站大型机组相继投入运行。从 2003 年开始，中国依托惠州、宝泉和白莲河等工程，通过招标和技贸结合、技术转让方式，逐步实现了蓄能机组设计制造国产化，单机额定容量最大的达 334MV·A。在建的单机额定容量最大（416MV·A）的仙居电站机组已于 2011 年开工。2000 年底，中国抽水蓄能电站总装机容量已达 5590MW，装机规模跃居世界第五位，仅次于日本、美国、意大利和德国。至 2012 年，中国抽水蓄能电站总装机容量达到 21 700MW，装机规模已超过日本，列世界首位。

典型大容量发电电动机的主要参数见表。

典型大容量发电电动机的主要参数

国名	电站名称	机组型式	发电机工况		电动机工况		额定电压 (kV)	额定频率 (Hz)	额定转速 (r/min)	飞轮力矩 (t·m²)	投运年份	制造厂
			容量 (MV·A)	功率因数 cosφ	功率 (MW)	功率因数 cosφ						
美国	勒丁顿	伞式	388	0.85	388	0.85	20	60	112.5	140 600	1973	日立
美国	赫尔姆斯	伞式	390	0.9	343	0.9	18	60	360	10 430	1981	西屋
美国	巴斯康蒂	半伞	389	0.9	348	0.9	20.5	60	257	6250	1985	西屋
英国	狄诺维克	悬式	330	0.95	296	0.95	18	50	500		1982	
德国	威尔	卧式	300	0.75	249	0.83	21	50	600	1900	1976	SIEMENS
韩国	三浪津	半伞	336	0.9	295	1.0	20	60	300	6500	1983	富士
日本	奥多多良木	半伞	320	0.95	314	1.0	18	60	300	12 000	1974	日立
日本	今市	半伞	390	0.9	361	0.95	15.4	50	428.6	7100	1988	东芝
日本	葛野川	半伞	475	0.85	438	0.95	18	50	500	5430	1999	日立
日本	葛野川	半伞	475	0.85	460	1.0	18	50	500±5%		2012	东芝
日本	神流川	半伞	525	0.9	464	0.95	18	50	500		2005	日立
日本	小丸川	半伞	345		333		16.5	60	600±24		2007	日立
中国	明湖	半伞	280	0.9	265	1.0	16.5	60	300	10 000	1984	三菱
中国	广州	半伞	333	0.9	300	0.95	18	50	500	3300	1993	ALSTOM
中国	十三陵	半伞	222	0.9	218	1.0	13.8	50	500	605	1995	ELIN
中国	天荒坪	悬式	333	0.9	336	0.975	18	50	500	3500	1998	GE
中国	桐柏	半伞	334	0.9	336	0.975	18	50	300	11 000	2005	ELIN
中国	泰安	半伞	278	0.9	274	0.975	15.75	50	300	7700	2006	富士
中国	琅琊山	半伞	167	0.9	164	1.0	15.75	50	230.8	8400	2007	ELIN
中国	张河湾	半伞	278	0.9	268	0.98	15.75	50	333.3	6400	2008	富士
中国	宜兴	悬式	278	0.9	275	0.98	15.75	50	375	5500	2008	GE
中国	西龙池	半伞	333	0.9	319.6	0.975	18	50	500	3600	2009	东芝、三菱
中国	惠州	悬式	334	0.9	330	0.95	18	50	500	3600	2009	ALSTOM、东电
中国	宝泉	悬式	334	0.9	315.4	0.975	18	50	500	3750	2009	ALSTOM、哈电
中国	黑麋峰	半伞	334	0.9	320	0.975	18	50	300	11 000	2009	ALSTOM、东电
中国	白莲河	半伞	334	0.9	325	0.975	15.75	50	250	18 500	2009	ALSTOM、东电
中国	响水涧	半伞	278	0.9	277	0.98	15.75	50	250	14 000	2011	哈电
中国	蒲石河	半伞	334	0.9	322	0.98	18	50	333.3	8600	2012	ALSTOM、哈电
中国	呼和浩特	悬式	334	0.9	320	0.975	18	50	500	3600	2014	东电、ALSTOM
中国	仙游	悬式	333	0.9	325	0.98	15.75	50	428.6	6000	2013	东电

choushui xuneng fadian-diandongji jidianbaohu

抽水蓄能发电电动机继电保护 (relay protection of pumped storage power generator/motor) 检测发电电动机电气故障或异常运行工况，发出告警信号，有选择地向断路器发出跳闸或停机等操作指令以终止故障发展的自动化装置。可逆式机组是抽水蓄能电站采用的主要机型，由于运行方式较多、工况转换频繁，增加了换相开关、起动母线和静止变频器（static frequency convertor，SFC）等一次设备，继电保护配置也相应地变得复杂。

发电和抽水工况下均应考虑配置的保护有纵联差动保护、定子接地保护、横差保护、低电压记忆过电流保护、定子过电压保护、定子过负荷保护、负序过流和转子表层过负荷保护、转子过负荷保护、转子一点接地保护、失磁保护、失步保护、高频保护、过励磁保护、电压相序保护、轴电流保护和断路器失灵保护等（见水轮发电机继电保护）。除上述保护外，还应考虑发电电动机在发电机运行工况、抽水工况的起动过程和电动机运行工况的特殊保护配置，以及发电电动机继电保护的换相问题。

发电机运行工况的继电保护　可逆式机组在发电机工况下有可能出现反水泵运行的异常现象，需设置逆功率保护。它检测发电机工况时由系统流向发电电动机的有功功率。电动机工况时保护应予闭锁。

抽水工况起动过程的继电保护　静止变频器起动过程中被拖动的机组、背靠背起动过程中的拖动机组和被拖动机组，在转速从零逐渐上升到额定值的过程中，机组处于励磁状态，机组和连接母线都流过低于工频（又称次同步）的电流，承受着低于工频的电压，需考虑机组在起动过程中的电气保护，如设置专用于低频（次同步）的过电流保护。同时投入低频范围能够正常运行的其他保护，闭锁低频范围有可能误动的保护。

电动机运行工况的继电保护　需要装设的保护有：①低功率保护。仅在电动机工况投入，检测电动机工况下失去电源或输入功率过低，保护作用于停机。②低频保护。检测电动机工况和调相工况运行时失去电源。它是调相工况

的失电保护和电动机工况低功率保护的后备保护。③低电压保护。抽水工况运行时，作为电源电压下降和消失的保护。

抽水蓄能发电电动机继电保护的换相　可逆式机组可正、反两个方向旋转，由换相开关来改变相序实现正转或反转，一切与相序有关的保护（纵差、负序电流、失磁和失步等阻抗元件保护等）均应换相，以适应不同工况。换相方式有3种：①采用不同的保护装置（模块），根据换相开关的位置来选择对应的保护装置（模块），实现不同工况下的保护。②采用硬件换相。共用一个保护装置（模块），通过变换输入电流的相序对应于不同工况。③采用软件换相。根据换相开关的辅助触点位置，利用软件切换相应的电流和电压相序。随着数字化保护的普及，软件换相逐步成为主流方式。

choushui xuneng jizu 15d kaohe shiyunxing

抽水蓄能机组15d考核试运行

（15d trial operation of pumped-storage unit）　抽水蓄能机组起动试运行结束前，对机组连续运行可靠性开展的考核性试验工作。其目的是确认机组能够安全、正常地连续运行，已具备投入商业运行的条件。该项试验合格也是机组安装调试单位向运行单位移交有关机电设备的必要条件。

抽水蓄能机组15d考核试运行要求蓄能机组连续15d保持完好状态，可随时按照电网调度指令起动运行。为达到考核目的，要求机组平均每天起动的次数不少于2次。在15d考核试运行期间，如果由于机组及附属设备制造或安装质量的原因引起中断，且故障处理和恢复机组完好状态及时，则中断前后的时间可累加计算。但若出现一次中断时间超过24h，或累计中断次数超过3次，或起动不成功次数超过3次等情况，则15d考核试运行重新开始。

抽水蓄能机组15d考核试运行期间需要监测并记录机组各部位振动、摆度是否正常，各轴承油温、瓦温是否正常，监测系统运行程序是否正确，机组及其附属设备运行是否稳定和正常等。

抽水蓄能机组15d考核试运行合格后，停机对机电设备进行全面的检查，消除并处理考核试运行中发现的缺陷，向运行单位移交机电设备，机组开始商业运行，同时开始计算抽水蓄能机组设备的质量保证期。

choushui xuneng jizu shuibeng gongkuang qidong fangshi

抽水蓄能机组水泵工况起动方式

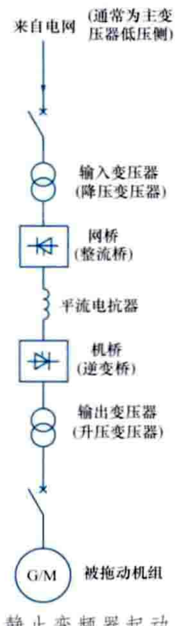
（pumping start mode of pumped-storage unit）　将抽水蓄能机组起动至水泵工况运行的方法。对于三机式抽水蓄能机组，可以用水轮机来起动水泵，不需要专用起动设备。而近代抽水蓄能机组以可逆式为主，这种机组抽水和发电用同一电机和同一转轮，仅旋转方向不同。作抽水工况运行时，机组从静止状态起动到水泵工况需要外加起动力矩。为了改善起动过程，降低起动设备的容量，减轻对机组及电网的冲击，机组起动前一般都作专门处置：①高压油顶转子，即往推力轴承注入高压油，在轴承与镜板间形成油膜，使机组刚起动时的静摩擦转矩减小到接近零；②转轮室压入空气，使转轮完全脱离水面，减小起动过程中的阻力转矩。

分类　常用的起动方法有异步起动、同轴小电机起动、背靠背同步起动和静止变频器起动等。

异步起动　在转子绕组经电阻短接的情况下，转子的阻尼绕组在定子旋转磁场作用下产生感应电流，使机组按感应电动机的原理起动并加速，待机组转速接近同步转速时加励磁，机组由同步力矩拉入同步。异步起动又分全压起动和降压起动两种方式。由于会对机组和电网造成冲击，因此异步起动只适用于小容量机组。

同轴小电机起动　在可逆式发电电动机组轴顶直接连接一台绕线式感应电动机，转子绕组经滑环与液体变阻器相连。机组起动时，投感应电动机的电源开关，使感应电动机在液体变阻器的控制下，按恒定力矩将机组起动加速，当发电电动机转速接近额定值时投励磁，在满足同步条件的情况下将机组投入电网。这种起动方式下，各机组自成单元，相互之间没有牵连，且对电网冲击不大。但机组由于增设了起动电动机而增加了高度，有可能使主厂房加高，还可能影响转动部分的稳定性。这种起动方式在新建抽水蓄能电站中已很少采用。

背靠背同步起动　利用本电站内或附近电站的一台容量足够的机组将待起动为水泵的机组同步地拖动起来。起动前两台机组在电气上互相连接，两台机组分别加上合适的励磁电流，作拖动用发电机的机组导叶逐渐开启，并将电动机带动起来，两机同步升速。按自动准同期方式调节发电机的频率和电压，在满足同步条件时将电动机投入电网；然后，作拖动用的发电机跳闸、停机。这种起动方式对电网和电机没有冲击。此方式在许多抽水蓄能电站被用作唯一的起动方式，在中国则多被用作静止变频器起动的后备方式。



静止变频器起动原理示意图

静止变频器起动　利用晶闸管变频装置输出频率逐渐上升的交流电源，将待起动的发电电动机组拖动起来。其原理如图所示，从电网输入的工频交流电源经整流器变成直流，然后逆变器在控制装置的控制下将直流变成频率从零起逐渐上升至工频的交流电流，从而将事先加了励磁的电机起动并加速到额定转速，在满足同步条件时将电动机投入电网。这种起动方式对机组和电网没有冲击，是新建的大型抽水蓄能电站的主流起动方式。

比较　可逆式抽水蓄能机组电气起动方式综合比较见表。

可逆式抽水蓄能机组电气起动方式综合比较

起动方式	异步起动	同轴小电机起动	背靠背起动	静止变频器起动
适用的机组容量	小	大	大	大
起动设备容量（相对主机容量,%）	60～120	6～8	15～20	6～8
起动时间（min）	1～3	5～10	2～5	3～5
对电网的影响	大	小	无	小

续表

起动方式	异步起动	同轴小电机起动	背靠背起动	静止变频器起动
需增加的起动设备	降压起动时需降压设备	起动小电机、液体变阻器、起动用配电装置	起动发电机、起动母线和断路器	变频装置、起动母线和断路器
控制特征	简单	较复杂	复杂	复杂
应用实例	岗南	德拉肯斯堡（南非）	广州、天荒坪、十三陵、泰山、桐柏、张河湾、大屋（法国）	广州、天荒坪、十三陵、泰山、桐柏、张河湾

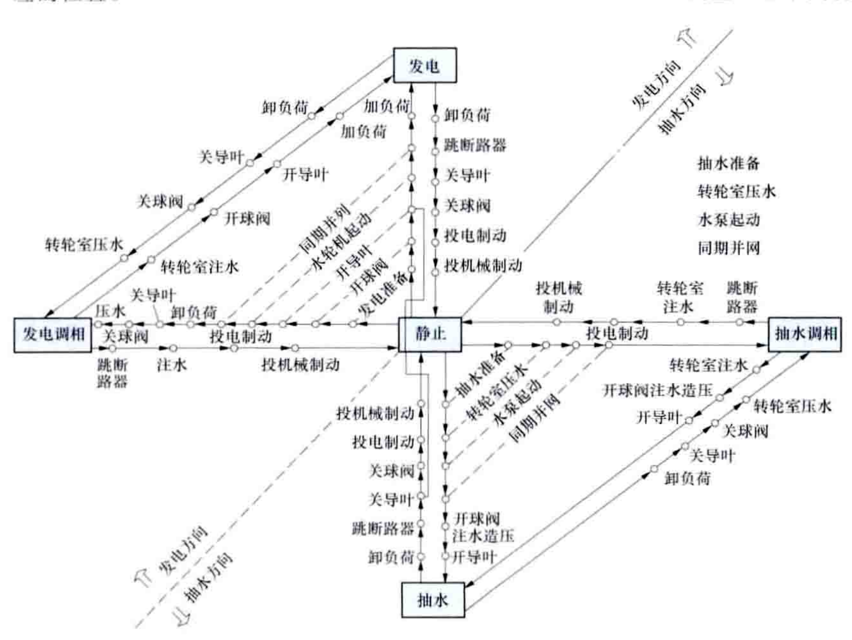
choushui xuneng jizu zidong kongzhi

抽水蓄能机组自动控制 （automatic control of pumped-storage unit） 对抽水蓄能机组工况及其转换过程进行自动控制的技术。与常规水轮发电机组相比，可逆式抽水蓄能机组的自动控制特点主要是：①运行工况多；②工况转换过程复杂。这是由于存在抽水工况引起的。

抽水蓄能机组的运行工况及其转换除常规水轮发电机组的静止、发电和发电方向调相（简称发电调相）3种运行工况（见水轮发电机组自动控制）外，还有抽水及抽水方向调相2种，共5种基本运行工况。5种基本运行工况内的转换多达20种，其中常用的有12种，此外还有抽水直接转发电的特殊工况转换，见下图。变速机组的情况则更为复杂。

抽水蓄能机组自动控制的几个特殊问题：

（1）换相开关的切换。可逆式抽水蓄能机组发电工况和水泵工况所接的系统电压相序相反，电气回路中设有换相开关。机组起动前，需将换相开关按选定的目标工况切换到相应的位置。



抽水蓄能机组的运行工况及其转换流程

（2）推力轴承减载。多数可逆式抽水蓄能机组采用高压油顶起装置，在起动过程中使镜板与推力轴瓦之间形成油膜，减小静摩擦阻力。为了在停机过程中保护推力轴承，机组转速下降到70%～90%额定转速时，也应投入转子的高压油顶起装置。

（3）转轮室压水。抽水蓄能机组抽水工况起动前，向转轮室通入压缩空气，将转轮室水位压至转轮以下一定位置，以减小起动阻力。

（4）注水造压。机组抽水工况起动，在转轮室无水条件下进行。同步并网后，转轮室要排气、充水，使转轮搅水造压。待转轮室压力达到零流量扬程值时，才能开始开启导叶和进水阀（球阀或蝴蝶阀）至抽水开度抽水，使其过程尽可能平稳，减少水力冲击和振动。

（5）进水阀和导叶的操作。抽水蓄能机组水头往往很高，机组导叶密封比较困难，因此机组在停机或调相工况下不仅要关闭导叶，还要关闭进水阀。导叶作为流量调节机构，在发电工况下，与常规机组导叶的操作方式相同；在抽水工况下，调速器根据水泵扬程调整导叶开度，实现扬程与导叶开度的最佳协联。

（6）停机制动。抽水蓄能机组要求有较短的工况转换时间，因此广泛采用电气制动停机。通常在转速为50%额定转速左右时投入，但电气制动力矩随机组转速下降而急剧下降。为此，在机组转速下降至5%额定转速左右时仍需投入机械制动，以进一步缩短停机过程，并防止因进水阀和导叶漏水而使机组长时间惰转。

参考书目

邱彬如，刘连希．抽水蓄能电站工程技术．北京：中国电力出版社，2008.

chuanzha

船闸 （navigation lock） 借助闸室内水位升降，使船舶克服上下游水位差安全过坝的通航建筑物。船闸通常由闸室、上下闸首、闸门、输水系统、上下游引航道、导航建筑物及靠船建筑物等组成，见图1。船只下行时，先通过输水系统向闸室内充水，待闸室水位与上游水位齐平时，开启上游工作闸门，船只从上游进入闸室，随即关闭上游工作闸门，闸室通过输水系统放水，待闸室水位与下游水位齐平时，开启下游工作闸门，船只出闸。上行时程序相反。

分类　按并列闸室的数目分为单线船闸和多线船闸。单线船闸只有一条可以过坝的航线。多线船闸有多条可以过坝的航线。按纵向排列的闸室数目，分为单级船闸和多级船闸。单级船闸是将全部水头作为一级，船舶经一次升降即可通过的船闸，只有一个闸室。多级船闸则将全部水头分为多级，有多个闸室逐级升降过船。多级船闸分各闸室首尾直接衔接的连续式和闸室之间有中间渠道的分离式两种类型。按设计最大过闸船舶吨级，船闸分为不同的级别。中国将船闸分为7级，见下表。

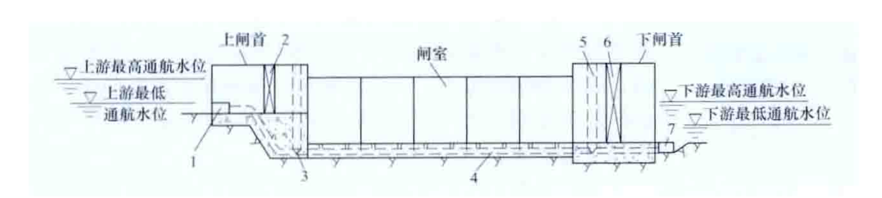


图 1 船闸纵剖面示意图

1—输水系统进口；2—上闸门；3—上游阀门；4—输水廊道；5—下游阀门井；6—下闸门；7—输水系统出口

船闸分级指标表

船闸级别	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅴ	Ⅵ	Ⅶ
设计最大过闸船舶吨级（t）	3000	2000	1000	500	300	100	50

布置原则　水头小于 30m 时，采用单级船闸；水头在 30～40m 范围内时，采用单级或两级船闸；水头大于 40m 时，需采用两级或多级船闸。船闸的线路和尺寸，主要根据设计船型、船队组合，以满足设计水平年内客、货运量及过船量的需要来确定。当单线船闸的通过能力在设计水平年内不能满足运量需要时，往往要修建两线或多线船闸。船闸的最高和最低通航水位，应根据水电枢纽、调度要求和航道冲淤变化影响等因素，在保证航运通畅和有利于防洪发电的前提下，综合研究确定。

船闸的闸首和闸室，常采用钢筋混凝土结构，平原地区小型船闸的闸室也有采用护坡形式的。船闸闸门常采用钢质人字门，也有采用平板门、横拉门、三角门和一字门的。船闸的输水系统，分集中输水系统和分散输水系统两大类。集中输水系统多通过闸首短廊道、闸首工作闸门等输水，可适用于水位差小、输水流量小的中小型船闸。分散输水系统则利用长廊道，通过分散于闸室两侧或底部的孔口输水，船闸内水面平稳，船舶受水的激荡力小，这种输水系统常用于水位差大、输水流量大的船闸。输水廊道上布置有控制输水的阀门，通常采用钢质平板门或反向弧形门。

简史　世界上最早的船闸雏形是公元 423～424 年在今中国江苏省扬州市附近的河段上建造的两座斗门（有闸门的建筑物），顺序启闭这两座斗门，船舶就能克服集中水位落差上行或下行。公元 984～987 年在今中国江苏省淮安至淮阴间的运河上利用双斗门修建了世界上最早的船闸。意大利 1481 年开始建造船闸。20 世纪以来，欧美等国多在较低水头的水利水电枢纽中修建船闸。世界上水位差最大的单级船闸为哈萨克斯坦建成的乌斯特-卡明哥尔斯克（Ust-Kamenogorsk）船闸，水位差达 42m。

中国船闸在 20 世纪 50 年代后发展较快，共修建各类船闸 900 多座，其中水头超过 20m 的已建和在建船闸共 24 座，占世界总数的 1/4。规模较大的长江葛洲坝水利枢纽三线船闸，其中 1、2 号船闸闸室长 280m，宽 34m，水位差 27m，可通过万吨级船队。1995 年通航的湖南五强溪水电站船闸，采用一线三级连续式，每级闸室尺寸均为长 130m、宽 12m，总水位差 60.9m，可通过 2×500t 级的船队。1996 年通航的福建水口水电站船闸，采用一线三级连续式，每级闸室尺寸均为长 135m、宽 12m，总水位差 57.36m，可通过 2×500t 级的船队。2003 年通航的长江三峡水利枢纽船闸，采用双线五级连续式（见图 2），每级闸室长 280m、宽 34m，总水位差 113m，可通过万吨级的船队，是世界上级数最多、总水位差最大的多线多级船闸。



图 2 三峡水电站双线五级船闸

chuangshazhi

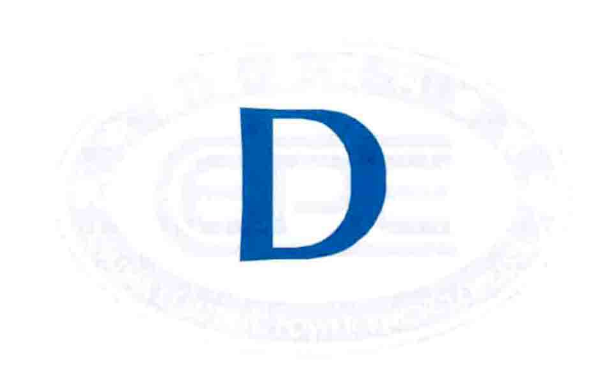
床沙质

（bed material load）　水流输移的泥沙中参与造床的部分。又称造床质。它是床沙的主体部分，但一般只占水流输移泥沙的一小部分，即水流输移的粗颗粒泥沙。床沙质既可以推移质或悬移质的形式存在于水流层，也可以静止的形式存在于床面层。两种形式的泥沙可以相互交换，相互补给。床沙质在水流中的含量取决于水流挟沙力，与来水条件之间具有确定的关系；在多沙河流上，则与来水条件及来沙条件均有关系。床沙质与冲泻质的划分尚无公认的理论方法，多采用经验办法，常用的一种方法是将床沙中最细的 10%（或 5%）看成是冲泻质，其余的 90%（或 95%）就是床沙质。

对于不同地区的河流来说，床沙质与冲泻质的划分是因地而异的。在山区卵石河流中，卵石是床沙质，沙以下是冲泻质；到了中下游沙质河流中，沙是床沙质，沙以下属于冲泻质；到近河口段，粉沙也可能是床沙质，黏土以下的物质则是冲泻质。即使在同一河段上，床沙质与冲泻质的划分也可能因流量而异。床沙质的输移是河床演变的决定性因素。

参考书目

钱宁，万兆惠．泥沙运动力学．北京：科学出版社，1983.



daba anquan dingqi jiancha

大坝安全定期检查 (regular inspection of dam safety)

对已投入运行大坝的结构安全性和运行状态进行的定期检查，简称大坝定检。目的是及时发现大坝异常现象和存在的隐患与缺陷，提出补救措施和改进意见，作为大坝维护、修复或加固、补修的依据。

大坝定检范围包括与大坝安全有关的横跨河床和水库周围垭口的所有永久性挡水建筑物、泄洪建筑物、输水和过船建筑物的挡水结构，以及这些建筑物与结构的地基、近坝库岸、边坡和附属设施。

大坝定检是政府对大坝安全进行监察的一项重要制度。国家电力监管部门负责全国电力系统水电站大坝定期检查的监督管理工作，并设大坝安全监察中心（简称大坝中心）负责大坝定期检查的具体工作。大型工程、高坝、工程安全特别重要的和存在问题较多的大坝的定期检查由大坝中心负责组织；对其他大坝，经大坝主管单位（或者是业主单位）申请，大坝中心可以委托其组织定期检查。大坝中心定期将水电站大坝定期检查和特种检查的结果，向国家水行政部门通报。

工作内容 主要内容包括：①制订大坝定检工作计划和工作大纲；②组织大坝定检专家组，专家组对大坝以往的运行状况与工作性态进行总结、检查、系统排查和评价，提出定检工作重点，确定定检工作大纲；③总结上一次大坝定检以来大坝运行状况，提出运行总结报告；④进行现场检查（含必要的水下检查），并提出现场检查报告；⑤根据大坝实际状况，进行必要的专项检查并提出专项检查专题报告；⑥审查专项检查专题报告，提出审查意见，承担专项检查的技术服务单位按专家组审查意见补充完善专题报告；⑦评价大坝安全状况，初评大坝安全等级，并提出大坝定检报告；⑧评定大坝安全等级，形成大坝定检审查意见。

工作程序 大坝定检分为日常巡查、年度详查、定期检查和特种检查。

日常巡查 由水电站运行单位负责。水电站运行单位组织专业技术人员对水电站大坝进行的经常性的巡视检查。巡视检查中发现的安全问题，立即处理；不能处理的，及时报告本单位有关负责人。巡视检查及处理情况以文字、图表的方式记载保存。

年度详查 由水电站运行单位负责。水电站运行单位在每年汛前、汛后或者枯水期、冰冻期对水电站大坝的详细检查，提出水电站大坝安全年度详查报告，报大坝中心备案。年度详查包括：①对监测资料进行年度整编分析。②对运行、检查、维护记录等资料进行审阅。③对与水电站大坝安全有关的设施进行全面检查或者专项检查。

定期检查 由大坝中心负责。大坝中心委托水电站大坝主管单位组织实施定期检查。定期检查一般每5年进行一次，检查时间一般不超过1年。新建工程的第一次定期检查，在工程竣工安全鉴定完成5年后进行。已运行40年以上的大坝，大坝主管单位结合定期检查进行全面复核鉴定；对有潜在危险的重要大坝，大坝主管单位根据现行技术规程规范，及时进行安全评价。大坝中心组织定期检查时，应当组成专家组。专家组根据水电站大坝的具体情况，确定专项检查项目和内容。水电站运行单位组织具有相应资质的单位进行专项检查，并向大坝中心提交有关专项检查情况的专题报告。大坝中心对专题报告进行审查，并根据水电站大坝实际运行情况，对水电站大坝的结构性态和安全状况进行综合分析，评定水电站大坝安全等级，提出定期检查报告，形成定期检查审查意见报国家电力监管部门备案。大坝中心委托水电站大坝主管单位组织实施的定期检查，由水电站大坝主管单位提出专家组名单。大坝中心审查专家组的组成，审查专家组确定的专项检查项目和内容，并派人参加定期检查。专家组向水电站大坝主管单位提出定期检查报告。大坝中心审查专家组提出的定期检查报告，必要时对有关的专题报告复审，评定水电站大坝安全等级，形成定期检查审查意见报国家电力监管部门备案。

特种检查 由水电站运行单位提出，大坝中心组织实施。发生特大洪水、强烈地震或者发现可能影响水电站大坝安全的异常情况时，水电站运行单位向大坝中心提出特种检查申请。大坝中心接到申请后，及时组织专家组确定检查项目和内容。对需要进行专项检查的项目，由水电站运行单位组织具有相应资质的单位进行专项检查，并向大坝中心提交有关专项检查情况的专题报告。大坝中心综合检查情况，提出特种检查报告。水电站运行单位根据特种检查报告进行整改。

安全评价 水电站大坝安全等级分为正常坝、病坝和险坝3级。病坝、险坝需限期除险加固、改造和维修，在评定为正常坝之前，改变运行方式或者限制运行条件。水电站大坝安全等级变更的，大坝中心需报国家电力监管部门备案。

正常坝 符合的条件包括：①设计标准符合规范要求；②坝基良好，或者虽然存在局部缺陷，但不构成对水电站大坝整体安全的威胁；③坝体稳定性和结构安全度符合规范要求；④水电站大坝运行性态总体正常；⑤近坝库区、库岸和边坡稳定或者基本稳定。

病坝 具有所列情形之一的水电站大坝：①设计标准不符合规范要求，并已限制水电站大坝运行条件；②坝基存在局部隐患，但不构成对水电站大坝的失事威胁；③坝体稳定性和结构安全度符合规范要求，结构局部已破损，可能危及水电站大坝安全，但水电站大坝能够正常挡水；④水电站大坝运行性态异常，但经分析不构成失事危险；⑤近坝库区塌方或者滑坡，但经分析对水电站大坝挡水结构安全不构成威胁。

险坝 具有所列情形之一的水电站大坝：①设计标准低于现行规范要求，明显影响水电站大坝安全；②坝基存在隐

患并已危及水电站大坝安全；③坝体稳定性或者结构安全度不符合现行规范要求，危及水电站大坝安全；④水电站大坝存在事故迹象；⑤近坝库区发现有危及水电站大坝安全的严重塌方或者滑坡迹象。

沿革 中国自1987年进行首轮大坝安全定期检查，截至2010年已完成三轮定期检查。2011年开始第四轮定期检查，计划2016年完成。

1987年首轮大坝定检共完成96座大中型水电站大坝，定检的要点是强调全面性，其中被评定为正常坝的共77座，占总数的80%，证明中国水电站大坝的安全状况是好的。1996年第二轮定检的重点，突出金属结构监测、水下检查及监测系统评价等，检查131座。2005年第三轮定检的重点是强调特殊性，针对不同的大坝、不同的问题重点检查143座。第四轮大坝定检工作已于2011年按计划进行。

daba anquan guanli

大坝安全管理

(dam safety management) 保证大坝安全运行所进行的各项活动。由于大坝建设的质量和大坝安全密切相关，因此大坝安全管理贯穿于大坝建设、运行和日常管理的各个阶段。水电站大坝一般有巨大的综合效益，一旦失事，将给社会和人民生命财产带来灾难性的损失。现代高坝大库日益增多，下游人口和经济日趋发展，溃坝的后果更为严重。为此，世界各国都十分重视大坝的安全工作，纷纷采取相应的安全保障措施。中国为加强对电力系统水电站大坝运行安全的监督和管理，1985年11月成立了大坝安全监察中心，负责大坝定期检查工作，并制定了《水电站大坝运行安全管理规定》、《水电站大坝安全注册办法》和《水电站大坝安全定期检查办法》，使水电站大坝安全管理的安全注册及安全定期检查工作更加规范化、制度化和标准化。

大坝建设阶段　水电站大坝在建设过程中的安全管理由项目法人负责。项目法人应严格执行基建审批程序，确保大坝的规划、勘测和设计符合国家的政策、法规和有关技术标准，使所设计的大坝具有能抵御各种可能风险的安全措施和足够的安全度，并有有效的安全监测手段。建设阶段要建立健全工程质量保证与监督检查体系和制度，确保建筑材料和大坝的施工符合设计文件、规程规范和合同的要求，使工程不留缺陷和隐患；通过工程安全鉴定等有效手段，保证工程验收工作的质量，具备大坝安全运行的基础条件。工程安全鉴定分为蓄水安全鉴定、竣工安全鉴定和专项安全鉴定，重点检查设计、施工等方面是否存在影响工程安全的问题，提出工程安全评价意见。

大坝运行阶段　水电站运行单位对本单位水电站大坝的安全运行负责。运行阶段的大坝要进行安全注册。水电站运行单位负责建立健全大坝安全规定。除贯彻执行国家颁发的有关法律、条例外，根据水电站大坝的具体情况，编制相应的安全管理文件。制定并执行大坝安全管理法规和大坝安全运行规章制度，并通过大坝安全监测、检查鉴定与大坝维修、加固改造、险情预计和处理等工作，保证大坝始终处于安全状态。

日常管理阶段　包括大坝安全注册登记及管理、大坝安全监测设施更新改造、大坝加固改造与缺陷消除、大坝安全检查。

(1) 大坝安全注册登记及管理。根据大坝的安全与管理水平，大坝安全注册分为甲、乙、丙3级，颁发相应的注册登记证，实行动态管理。

(2) 大坝安全监测设施更新改造。对不完善的监测设施进行更新改造，提高观测的准确性、稳定性、可靠性和实时性。

(3) 大坝加固改造与缺陷消除。对定期检查确认的病坝与险坝，必须进行补强加固或改造；对正常坝存在的缺陷，也应采取措施予以消除。加固改造与消除缺陷项目的设计与施工，应按有关规定严格控制质量。

(4) 大坝安全检查。分为日常巡查、年度详查、定期检查和特种检查4种形式（见*大坝安全定期检查*）。其中，定期检查是对大坝的设计、施工、运行和大坝现场进行全面复核和检查，并对大坝作出安全评价。

daba anquan jiance

大坝安全监测

(dam safety monitoring) 通过巡视检查和仪器检测对大坝本体、设备、地基与周围环境进行观察和测量，为检验设计、指导施工、提高运行管理水平、安全鉴定提供科学依据。

安全监测管理 包括监测系统的设计、审查、施工、监理、验收、运行、更新改造和相应的管理等工作。监测系统必须与大坝主体工程同时设计、同时施工、同时投入生产和使用。

设计和施工　大坝工程建设单位（以下简称建设单位）对监测系统的设计、施工和监理承担全面管理责任。建设单位需加强施工期和首次蓄水期大坝安全监测工作。

运行管理　大坝投入运行后，监测系统的运行管理由水电站运行单位负责。

水电站运行单位制定大坝安全监测管理制度和操作规程，建立大坝安全监测技术档案。同时按照有关要求开展大坝安全监测工作，不擅自改变监测的项目、测点、频次和期限。及时整理、分析监测数据，每年3月底前完成对上一年度监测资料的整编。

水电站运行单位或大坝主管单位按照《水电站大坝运行安全信息报送办法》(电监安全〔2006〕38号）向大坝中心等有关单位报送大坝安全监测信息。

安全监测设备　监测设备的封存、报废，监测项目、测点、频次和期限的调整，由水电站运行单位提出、大坝主管单位审查，经大坝中心确认后实施。

监测系统在系统功能、性能指标、监测项目、设备精度及运行稳定性等方面不能满足大坝运行安全要求的，水电站运行单位负责对其进行更新改造。监测系统的更新改造需进行专项设计、专项审查、专项施工和专项验收。验收合格后，水电站运行单位将监测系统更新改造的设计、审查、安装调试、试运行、竣工验收等相关技术资料报大坝中心备案。

安全监测过程 水电站运行单位负责对监测系统的日常巡查、年度详查和定期检查。监测系统的定期检查一般为5年一次，也可结合*大坝安全定期检查*进行。大坝安全监测贯穿于施工、蓄水、运行的全过程，内容包括巡视检查、

监测、资料整理与分析等。

巡视检查　主要采用人工巡查方式，对坝体、坝基、坝肩、输水和泄水建筑物、近坝区岸坡及金属结构等进行可察觉的异常现象的检查。当有异常情况时，采用文字、素描及摄影等方法进行记录。巡查主要包括经常性的日常巡查，每年汛前、汛后及高水位、低气温时进行的年度巡查，以及发生有感地震或大洪水等情况的特种检查。

监测　主要有环境、变形、渗流、应力应变及温度和专项等。

（1）环境监测。上、下游水位采用自记水位计监测；气温及水温采用水银温度计、电阻温度计、光纤光栅温度计监测；降雨量采用雨量计监测；水库淤积采用声波法监测；冰压力采用压力传感器监测。

（2）变形监测。大坝及其基础的水平位移和挠度采用正倒垂线、引张线、视准线、激光准直、交会法等监测；垂直位移及倾斜采用精密水准、静力水准、激光准直、电磁式沉降仪、水管式沉降仪、基岩变位计、多点位移计、测斜仪等监测；接缝和裂缝采用标点法、测缝计、裂缝计、钢丝位移计、位错计等监测。

（3）渗流监测。渗流量采用容积法、量水堰、集水井等方法监测；坝基扬压力和坝体孔隙水压力采用测压管（孔）和渗压计进行监测；绕坝渗流采用测压管（孔）及渗压计监测；水质分析采用化学分析方法监测。

（4）应力应变及温度监测。混凝土坝、土坝、岩体内的应力应变采用应力计、应变计、无应力计、钢筋计、锚杆应力计、锚索测力计、土压力计、位移计等仪器监测；混凝土温度采用电阻温度计和光纤光栅温度计监测。

（5）专项监测。水流形态采用摄影测量法监测；流速采用浮标、流速仪法监测；脉动压力采用测压管和压力传感器测量；空蚀采用水下噪声探测仪和录像机拍摄；通气量采用风速仪和压力表测量；雾化采用雨量计或地面摄影测量；结构动力特性采用振动计、加速度计、应变计、动态应变仪测量；强振监测采用固态地震强度记录仪测量。

资料整理与分析　观测数据本身既含有大坝实际状态的信息，又带有观测误差及外界偶然因素随机作用所造成的干扰，须经辨析识别，进行误差处理，使监测成果真实地反映大坝工作状态，用以评价大坝的安全性态。监测资料整理后，应定期进行资料汇集、校审、绘图及分析，编写说明后形成系统的整编资料，可结合年度报告进行。

（1）资料分析方法。有比较法、作图法、特征值统计法及数学模型法。通过这些方法分析监测成果是否具有一致性、合理性、稳定性和规律性，认识监测成果反映的时序变化规律、分布态势及影响因素，查找异常现象，作出安全评估。

（2）资料分析内容。分析监测资料的准确性、可靠性和精度，对观测资料存在的观测误差及偶然误差，以及仪器故障、输入造成的误差进行处理，以保证分析资料的有效性和可靠性；绘制物理量过程线、分布图，分析监测物理量随时间和空间的变化规律，以及趋势是否有异常；统计各物理量历年的最大、最小值，变幅，周期，年平均值及变化趋势；将物理量与监控指标、预报值进行比较，判断测值是否异常；利用数学模型分析物理量与原因量之间的关系，即物理量与上下游水位、自重、温度、时效等因素的关系，分析物理量观测值与预报值之差是否在 2σ 范围内；分析上下游灌浆廊道排水幕处扬压力水位或扬压力系数是否在设计允许范围内，用以检验防渗帷幕效果；计算坝基扬压力，与设计值比较，若超过设计值，应进行大坝稳定性校核，并采取降低扬压力的措施；分析巡查资料，结合巡查记录和报告反映情况，如坝体和基础廊道裂缝是否扩张，裂缝是否有渗漏水及渗流量变化，分析渗流量有无异常等，对大坝的安全性态进行评价（见大坝安全定期检查）。对于危险类型的坝，必须经过加固、补强、改造或改变运行方式，才能保证大坝安全。病坝为带病运行的坝，需要进行维修或补强，才能达到正常运用标准。

安全监测的发展趋势　大坝安全监测技术已取得较大进步，很多大坝采用自动化监测，它能实现数据自动化采集传输、存储和数据管理等功能，具有测读快，测读及时，能够做到相关量同步观测，胜任多测点、密测次的要求，在时间上和空间上提供更为连续的信息，且测读准确性和可靠性高等优点。除自动化外，还尝试利用全球定位系统（global positioning system，GPS）测量大坝水平位移；对于长度较长的大坝，采用连续引张线法监测坝体水平位移；传感器方面除常用钢弦式、差阻式传感器外，光纤光栅传感器已在工程部门开始应用。弦式、差阻式传感器埋入三峡坝体内 13 年后仍能取得可信的测值。法国 SITES 公司生产的三维激光扫描变形监测系统和意大利生产的 IBIS-L 地形微变远程监测系统均能测量大坝表面变形，其中 IBIS-L 是通过发射并接收电磁波，运用高频电磁波的相位差对大坝表面的微小变形进行监测，并在紫坪铺、龙头石大坝应用。1989 年前意大利对大坝变形进行联机实时在线监控，实现观测值与数学模型计算值即时进行比较，分析评价大坝的安全性态。随着计算机技术的发展，实时在线监控新技术已用于大坝变形、坝基扬压力、渗流量的安全监控。

一些大型水电站已采用大坝监测管理信息系统，包括数据库、数据分析软件，具有物理量计算、过程线分布图绘制和报表打印等功能，还具有多媒体演示功能。一些部门正在研制开发大坝安全评价专家系统、决策支持系统，通过网络可向专家咨询，以达到大坝安全及时评价和防止事故发生的目的。

Dachaoshan Shuidianzhan

大朝山水电站　(Dachaoshan Hydropower Station)

位于中国云南省云县和景东彝族自治县交界的澜沧江干流上，距昆明市约 600km。电站开发任务以发电为主，装机容量 1350MW，多年平均年发电量 59.31 亿 kW·h，见图 1。

水库特性　水库正常蓄水位 899.00m，总库容 9.4 亿 m^3。死水位 882.00m，相应库容 3.73 亿 m^3。挡水和泄水建筑物按 500 年一遇洪水设计、5000 年一遇洪水校核，相应洪峰流量分别为 18 200m^3/s 和 23 800m^3/s，对应库水位分别为 899.00m 和 905.89m。

工程地质条件　坝基及地下厂房围岩岩性以玄武岩为主，夹有薄层凝灰岩。

枢纽布置　枢纽工程由大坝、泄水建筑物、引水发电系统等组成，见图 2。



图 1　大朝山水电站

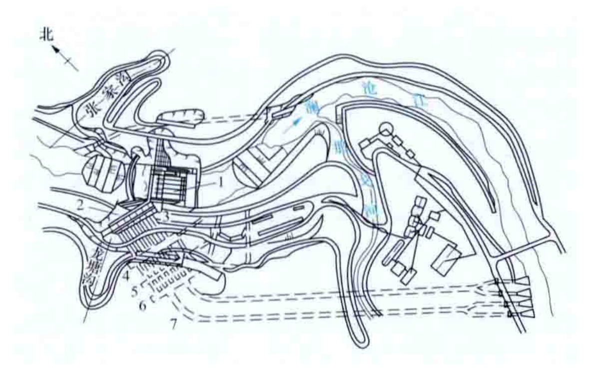


图 2　大朝山水电站枢纽平面布置图

1—河床碾压混凝土重力坝及溢流表孔；2—电站进水口坝段；
3—引水隧洞；4—地下厂房；5—主变压器室；
6—尾水调压室；7—尾水隧洞

大坝　全断面碾压混凝土重力坝，折线形布置。最大坝高 111m，坝顶高程 906.00m，坝轴线（包括进水口坝段）总长度 460.39m。碾压混凝土坝筑坝材料采用磷矿渣和凝灰岩的混磨料（PT 掺合料）代替粉煤灰，作为碾压混凝土和常态混凝土的掺合料。

泄水建筑物　设计最大泄量 23 800m^3/s（校核水位），设 5 个 14m×17m（宽×高）溢流表孔、3 个 7.5m×10m（宽×高）泄洪排沙底孔和 1 个 3m×6m（宽×高）排沙孔。5 个表孔的泄量为 16 646m^3/s，单宽流量 193.6m^3/（s·m），采用“宽尾墩＋戽式消力池”联合消能。宽尾墩下游坝面碾压混凝土施工时，采用加水泥净浆的变态混凝土，一次成型形成台阶式坝面，分层通仓进行碾压施工。台阶尺寸为 1m×0.7m（高×宽），第一级台阶高度 2.0m。

引水发电系统　位于右岸，包括引水及尾水系统、厂房等。

引水及尾水系统：进水口坝段共设 6 个机组进水口，底板高程 860.00m，上游侧各设一道平面拦污栅和事故闸门。压力引水隧洞为单机单管引水，引水隧洞直径由 8.5m 至下平段变为 8.0m。尾水系统为两组三机一室一洞布置格局。机组尾水由 6 条尾水管洞（9.22m×14.45m）进入两个并列的矩形长廊阻抗式尾水调压室，尺寸为 217.4m×22.4m×72.63m（长×宽×高），其后各接一条内径为 15m 的长尾水隧洞，长度分别为 1125.81m 和 1082.37m。尾水隧洞穿过那戈河底，在大坝下游约 2.5km 汇入澜沧江。

厂房：地下式，主厂房开挖尺寸 233.90m×26.40m×62.93m（长×宽×高）。厂房内共装设 6 台额定容量为 225MW 的立轴混流式水轮发电机组。水轮机额定水头 72.5m，额定转速 115.4r/min，最大水头 85.63m，最小水头 53.02m。转轮直径 6063mm，采用 X 形叶片转轮，设有筒形阀。发电机为半伞式、空气冷却，额定电压 15.75kV，额定功率因数 0.9，采用静止晶闸管励磁系统，1～4 号机组出口设置发电机断路器。电站装有 4 台 500kV 和 2 台 220kV 升压变压器，1 台 500kV/220kV 联络自耦变压器。GIS 开关站布置在地面 973m 高程开关楼内，楼顶布置 500kV 和 220kV 出线场。电站出线为 500kV 2 回、220kV 3 回，备用 1 回 220kV 出线间隔。

工程施工　工程于 1997 年 8 月开工，2001 年 11 月下闸蓄水，2001 年 12 月首台机组并网发电，2003 年 10 月 6 台机组全部投产发电。

主要工程量：土石方明挖 440 万 m^3，石方洞挖 164 万 m^3，混凝土浇筑 175 万 m^3（其中碾压混凝土 75.6 万 m^3），金属结构安装 10 680t（其中压力钢管 2772t），钢筋及钢材 74 000t。

设计单位　北京勘测设计研究院（现中国水电顾问集团北京勘测设计研究院）、昆明勘测设计研究院（现中国水电顾问集团昆明勘测设计研究院）勘察。

建设单位　云南大朝山水电有限责任公司。

dadi zuobiaoxi

大地坐标系

大地坐标系　（geodetic coordinate system）　以地球参考椭球中心为圆心、起始子午面和赤道面为基准面的地球坐标系。又称地理坐标系。地面点的位置用大地经度 L、大地纬度 B 和大地高度 H 表示。中国水电工程常用的大地坐标系有 1954 北京坐标系、1980 西安坐标系、2000 国家大地坐标系（CGCS2000）等国家法定坐标系统，以及国际通用的 WGS84 坐标系和根据工程需要建立的地方坐标系。中国国家法定坐标系统采用 6°和 3°分带、主子午线由东经 75°起计算高斯-克吕格平面直角坐标（高斯正形投影），以主子午线和赤道的交点作为纵坐标起算的零点，横坐标定为 500 000m。

1954 北京坐标系　采用克拉索夫斯基椭球，按三角锁联测的方法从苏联普尔科沃天文台的大地基点传递过来，经各局部外业逐步布测并分别平差后，得到中国三角点的平差成果。其参考椭球参数为

长半轴　$a = 6\,378\,245$m

扁率　$f = 1/298.3$

该坐标系的高程以 1956 年青岛验潮站求出的黄海平均海面为基准。

1980 西安坐标系　采用 1975 国际椭球，椭球短轴平行于地球自转轴（由地球质心指向 JYD 1968.0 地极原点方向），起始子午面平行于格林威治平均天文子午面，采用多点定位所建立的大地坐标系。又称 1980 年国家大地坐标系。大地原点选在陕西省泾阳县永乐镇，其参考椭球参数为

长半轴　$a = 6\,378\,140\text{m} \pm 5\text{m}$

短半轴　$b = 6\,356\,755.288\,2$m

扁率　$\alpha=1/298.257$

第一偏心率平方$=0.006\,694\,384\,999\,59$

第二偏心率平方$=0.006\,739\,501\,819\,47$

该坐标系的高程以1956年青岛验潮站求出的黄海平均海面为基准。

2000国家大地坐标系　采用ITRF2000国际参考椭球右手直角坐标系，原点为包括海洋和大气的整个地球的质量质心，Z轴为国际地球旋转局参考极方向，X轴为国际地球旋转局的参考子午面与垂直于Z轴的赤道面的交线，Y轴与Z轴和X轴构成右手正交坐标系。2000国家大地坐标系于2008年7月1日全面启用，其地球椭球参数为

长半轴　$a=6\,378\,137\text{m}$

扁率　$f=1/298.257\,222\,101$

地心引力常数　$GM=3.986\,004\,418\times10^{14}\,\text{m}^3/\text{s}^2$

自转角速度　$\omega=7.292\,115\times10^{-5}\,\text{rad/s}$

WGS84坐标系　一种国际通用的地心坐标系，坐标原点为地球质心，其地心空间直角坐标系的Z轴指向BIH（国际时间）1984.0定义的协议地球极（CTP）方向，X轴指向BIH 1984.0的零子午面和CTP赤道的交点，Y轴与Z轴、X轴垂直构成右手坐标系，称为1984年世界大地坐标系统。WGS84坐标系由美国于1987年建立，采用的椭球参数（1994年推荐值）为

长半径　$a=6\,378\,137\text{m}\pm2\text{m}$

地球引力和地球质量的乘积　$GM=(3\,986\,004.418\times10^8\pm0.6\times10^8)\,\text{m}^3/\text{s}^2$

正常化二阶带谐系数　$C_{2,0}=-484.166\,85\times10^{-6}\pm1.3\times10^{-9}$

地球重力场二阶带球谐系数　$J_2=108\,263\times10^{-8}$

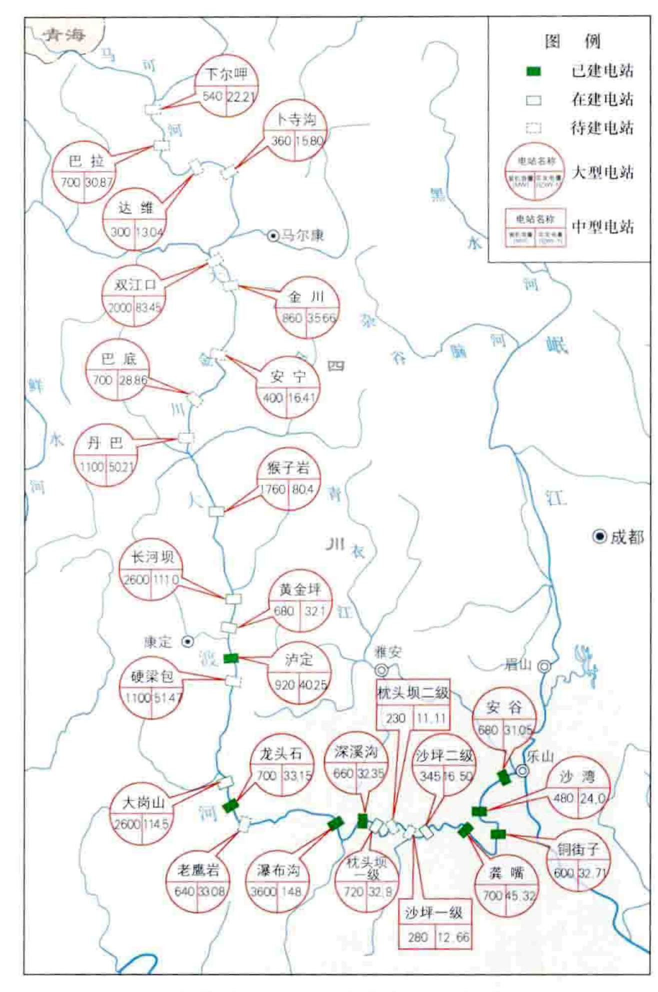
地球自转角速度　$\omega=(7\,292\,115\times10^{-11}\pm0.150\times10^{-11})\,\text{rad/s}$

扁率　$f=1/298.257\,223\,563$

地方坐标系　局部地区建立平面控制网时，根据需要投影到任意选定面上和（或）采用地方子午线为中央子午线的一种直角坐标系。

Dadu He shuidian guihua

大渡河水电规划　（hydropower development planning of Dadu River）　在成都勘测设计研究院1990年编制的《四川省大渡河干流规划报告》中，大渡河干流双江口至铜街子段布置有独松、马奈、丹巴、季家河坝、猴子岩、长河坝、冷竹关、泸定、硬梁包、大岗山、龙头石、老鹰岩、瀑布沟、深溪沟、枕头坝、龚嘴、铜街子共17级水电站。根据成都勘测设计研究院2003年编制的《四川省大渡河干流水电规划调整报告》和《大渡河干流（铜街子至青衣江汇口段）水电开发研究报告》，大渡河干流布置有下尔呷、巴拉、达维、卜寺沟、双江口、金川、巴底、丹巴、猴子岩、长河坝、黄金坪、泸定、硬梁包、大岗山、龙头石、老鹰岩、瀑布沟、深溪沟、枕头坝、沙坪、龚嘴、铜街子、沙湾、安谷共24级水电站（见图），总装机容量24 560MW，多年平均年发电量1180亿kW·h。在后续规划补充工作中，考虑移民、环保等因素，沙坪梯级调整为沙坪一级和沙坪二级两级开发，枕头坝梯级调整为枕头坝一级和枕头坝二级两级开发，巴底、丹巴两级开发调整为安宁、巴底和丹巴三级开发，老鹰岩河段开发方式调整工作正在进行中。



大渡河梯级水电站布置图及开发现状

大渡河发源于青海省果洛山东南麓，分东、西两源，东源脚木足河与西源绰斯甲河于双江口汇合后称大金河，至丹巴始称大渡河，继而流经泸定、石棉、汉源等地于乐山市汇入岷江，河长1062km，流域面积77 400km²，河口处多年平均流量1490m³/s，干流水能理论蕴藏量（见水能资源）1753亿kW·h/a。

大渡河干流的主要开发任务是发电，兼顾防洪、航运、供水。双江口以下河段的地理位置靠近负荷中心，水库调节性能较好，对外交通较方便。其中，双江口、长河坝、大岗山、龙头石、瀑布沟、龚嘴、铜街子等水电站的指标较好。已建成的水电站有龙头石、瀑布沟、深溪沟、龚嘴、铜街子和沙湾水电站。已开工建设的水电站有猴子岩、长河坝、大岗山、黄金坪、安谷、枕头坝一级、沙坪二级。其他水电站均在开展前期工作。

瀑布沟、双江口和下尔呷水电站是全梯级的控制性水库电站工程。

瀑布沟水电站是大渡河下游的控制性水库电站，利用落差178m，电站装机容量3300MW，多年平均年发电量138亿kW·h；水库正常蓄水位850m，调节库容38.8亿m³，可使其下游梯级电站增加保证出力560MW，增加多年平均

年发电量 12.3 亿 kW・h。

双江口水电站为大渡河干流上游的控制性水库电站，利用落差 240m，装机容量 2000MW，多年平均年发电量 81.5 亿 kW・h；水库正常蓄水位 2500m，调节库容 19.2 亿 m^3，可使其下游梯级电站增加保证出力 1870MW，增加多年平均年发电量 23.7 亿 kW・h。

下尔呷水电站是大渡河的“龙头”水库电站，利用落差 200m，装机容量 600MW，多年平均年发电量 22.2 亿 kW・h；水库正常蓄水位 3120m，调节库容 19.3 亿 m^3，可使其下游梯级电站增加保证出力 2300MW，增加多年平均年发电量 24.0 亿 kW・h。

Daguli Shuidianzhan

大古力水电站 (Grand Coulee Hydropower Station)

位于美国西北部哥伦比亚河干流上。电站以发电为主，兼有提水灌溉、防洪、调节径流、旅游等综合利用效益，见图 1。总装机容量 6809MW，多年平均年发电量 248 亿 kW・h。电站分两期建设，初期建设第一和第二厂房，装机容量 1974MW；二期增建第三厂房，并对初期安装的机组扩容，安装抽水蓄能机组。电站采用 220kV 高压输电，扩建后改用 500kV 超高压输电。

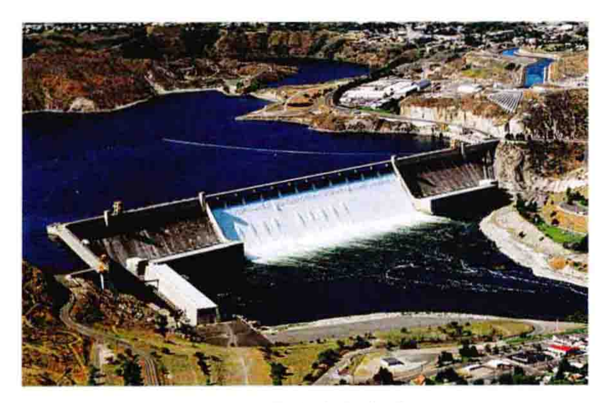


图 1　大古力水电站

水文和水库特性　坝址以上流域面积 19.2 万 km^2，平均年径流量 963 亿 m^3。水库正常蓄水位 393.00m，相应库容 118 亿 m^3，调节库容 64.5 亿 m^3，可进行多年调节。

工程地质条件　坝址基岩为花岗岩。

枢纽布置　枢纽工程由大坝、泄水建筑物、厂房、灌溉抽水站等组成，见图 2。

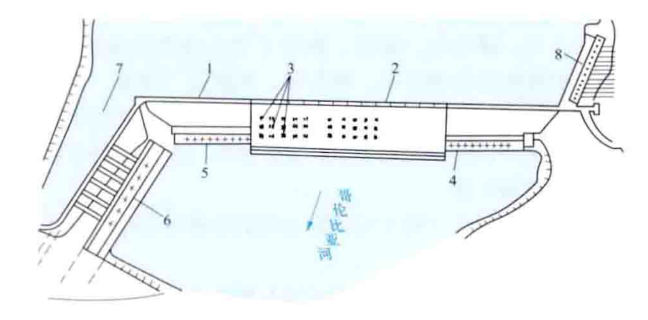


图 2　大古力水电站枢纽平面布置图

1—混凝土重力坝；2—溢流坝；3—泄水孔；4—第一厂房；5—第二厂房；6—第三厂房；7—扩建的前池；8—抽水站

大坝　主坝为混凝土重力坝，最大坝高 168m，连同扩建的前池坝总长 1592m。

泄水建筑物　包括溢流坝和泄水孔。溢流坝顶设 11 个溢流孔，单孔宽 41m、高 8.5m，用鼓形闸门控制，泄洪能力为 28300m^3/s。溢流坝右侧 7 孔溢流孔宽度的坝体内设有 60 个泄水孔，孔径 2.6m，分 3 层布置，泄流能力 7790m^3/s。下游采用消力戽消能。

厂房　第一和第二厂房内各安装 9 台混流式水轮发电机组，单机容量 108MW；20 世纪 70 年代更换发电机绕组，单机出力提高到 125MW。第一厂房装有 3 台厂用机组，单机容量 10MW。第三厂房内安装单机容量 600MW 和 805MW 的机组各 3 台，单机最大出力分别为 730MW 和 827MW。

大古力水电站的装机容量扩大到初期规模的 3.5 倍，主要原因为：①美国与加拿大于 1961 年签订哥伦比亚河条约，加拿大在上游兴建了 3 座大水库，美国也在支流上建了几座大水库，增加了径流调节能力，电站保证出力大大提高；②电站从担负基荷变为担负峰荷运行方式。

灌溉抽水站　抽水站内安装 12 台机组，前 6 台为电动水泵，后 6 台为抽水蓄能机组，电动机功率共计 590MW，抽水扬程 85～110m，抽水能力 611.6m^3/s，提水灌溉哥伦比亚河左岸干旱高地 44.3 万 hm^2。利用岸上调节水库调蓄，抽水蓄能机组可提供调峰容量 314MW。

工程施工　工程于 1933 年开工，建设第一和第二厂房，于 1941～1950 年陆续发电。20 世纪 70 年代增建第三厂房，并对初期安装的机组扩容，安装抽水蓄能机组。第三厂房于 1980 年完工，抽水蓄能机组与 1984 年完工。

主要工程量和投资：初期工程，开挖土方 1570 万 m^3、石方 160 万 m^3，混凝土量 809 万 m^3；扩建工程，开挖土方 1379 万 m^3、石方 380 万 m^3，浇筑混凝土 109 万 m^3。

按 1932 年价计，初期工程（不含厂房）投资 1.63 亿美元，完工时 2.7 亿美元，按 1998 年价计 26 亿美元；按 1967 年价计，第三厂房投资 3.9 亿美元，由于 1973 年人工费涨价，完工时追加 7.3 亿美元，合计为 11.2 亿美元，按 1998 年价计为 29.3 亿美元。

Dawu Choushui Xuneng Dianzhan

大屋抽水蓄能电站 (Grand Maison Pumped Storage Power Station)

位于法国东南部阿尔卑斯山区的欧达尔河上。电站装机容量 1800MW。输电电压 400kV，在电力系统中起调峰填谷和紧急事故备用的作用。

枢纽布置　枢纽工程由上水库、下水库、水道系统、厂房等组成，见图 1。

上水库　正常蓄水位 1695m，相应库容 1.4 亿 m^3。大坝为心墙土石坝，坝高 160m。

下水库　正常蓄水位 768.50m，相应库容 1560 万 m^3。大坝为沥青混凝土面板堆石坝，坝高 42m，坝下为深覆盖层，最大厚度达 80m，见图 2。采用深 50m 的悬挂式混凝土防渗墙防渗。

水道系统　进水口布置在上水库大坝左岸，采用 1 条圆形断面压力隧洞引水，长 7105m，洞径由 7.7m 渐变为 6.9m；末端设阻抗式调压井，内径 10m，井高 220m，井内全部采用钢板衬砌，钢板最大厚度 29mm。调压井后接 3 条

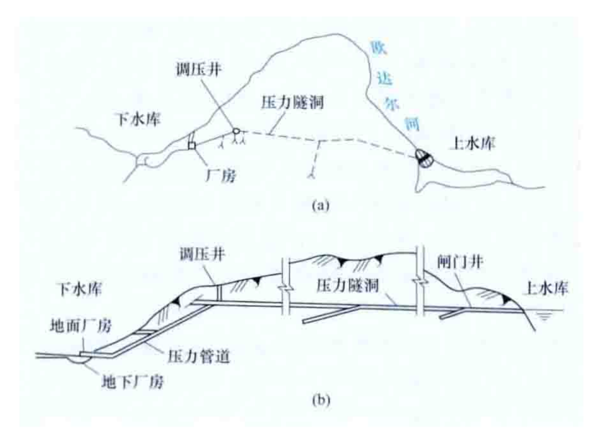


图 1 大屋抽水蓄能电站工程示意图

(a) 平面布置示意图；(b) 水路纵剖面图



图 2 大屋抽水蓄能电站大坝

平行布置的压力管道，长 1801m，最大设计水头 840m，全部采用钢板衬砌，最大厚度 46mm。3 条压力管道分岔为 6 条支管，其中 3 条支管引至地面厂房，3 条支管引至地下厂房，8 条尾水管汇成 2 条洞径为 4.6m 的尾水隧洞。

厂房　设地面厂房和地下厂房各 1 座，采用重叠布置，其间高差 70m。地面厂房内安装常规冲击式机组，地下厂房内安装可逆式机组。

可逆式机组的水泵水轮机为立轴四级混流式，转轮直径 2.215m。水轮机工况下，工作水头为 821.5～955m，单机流量 18.1m³/s，额定出力 152.5MW；水泵工况下，抽水流量 17.3m³/s，最大输入功率 157MW。发电电动机为半伞式，额定出力 170MV·A，额定电压 15.5kV，额定转速 600r/min。4 台常规机组由五喷嘴冲击式水轮机和悬式发电机组成。水轮机工作水头 812～922m，转轮直径 2.7m，单机流量 19.5m³/s，额定出力 158.5MW。

工程施工　工程于 1980 年开工兴建，1986 年开始发电，1987 年竣工。

Dayang Zhou shuineng ziyuan

大洋洲水能资源 (hydropower resources of Oceania)

根据英国《国际水电与大坝》杂志 2011 年发布的《World Atlas》统计，大洋洲水能资源理论蕴藏量约 6580 亿 kW·h/a，技术可开发量约 1850 亿 kW·h/a，经济可开发量 887 亿 kW·h/a，是各大洲中水能资源最少的洲。

大洋洲陆地面积 897 万 km²，是世界上最小的洲，由澳大利亚大陆及一些岛屿组成。澳大利亚面积 768.23 万 km²，占全洲面积的 85.6%，其次为新几内亚岛（伊里安岛）和新西兰，分别占 10.2%和 3%，其他群岛和岛屿面积均较小。

澳大利亚虽然面积最大，但西部大部分为沙漠和半沙漠地区，气候干旱，水能资源不丰富。澳大利亚水能资源理论蕴藏量 2650 亿 kW·h/a，经济开发资源量仅约 300 亿 kW·h/a。巴布亚新几内亚和新西兰虽然面积仅占全洲的 13%，由于地形高差大和降水丰富，水能资源相对较丰富，两地区水能资源理论蕴藏量分别为 1750 亿 kW·h/a 和 2060 亿 kW·h/a，占全洲的 58%以上；经济可开发资源分别为 368 亿 kW·h/a 和 400 亿 kW·h/a，占全洲近 73%。

新西兰的水能资源经济可开发量已开发约 60%，澳大利亚为 58%，巴布亚新几内亚仅为 6%左右。

da-zhongxing shuidianzhan

大中型水电站 (large and medium-sized hydropower stations)

世界各国对大中型水电站的划分标准不统一。中国依据《水利水电工程等级划分及洪水标准》（SL 252—2000），将大中型水电站分为大（1）型、大（2）型和中型，其中装机容量大于等于 1200MW 的水电站为大（1）型水电站；装机容量小于 1200MW，且大于等于 300MW 的水电站为大（2）型水电站；装机容量小于 300MW，且大于等于 50MW 的水电站为中型水电站。

特点　包括：①多分布于大中型河流的干流上，分布较为集中，且单机规模也较大，便于规模化开发。②综合效益更加显著，部分大中型水电站除承担发电任务外，还承担防洪、供水、灌溉、航运、促进地方经济社会发展等任务。③大中型水电站的水库多具有一定的水量调节能力。④征地移民安置数量相对较多。⑤建设条件差异较大，技术难度较高。

中国大中型水电站　根据《中华人民共和国水力资源复查成果（2003 年）》，中国大中型水电站技术可开发装机容量达到 476 430MW，多年平均年发电量 21 847 亿 kW·h（见表），占水能资源技术可开发总量的 88.3%。大型水电站技术可开发装机容量和多年平均年发电量占全国的比重达 71.8%和 72.4%，其中装机容量 1000MW 及以上的水电站装机容量共达 315 594MW，多年平均年发电量共达 14 579.07 亿 kW·h，占全国的比重均超过 50%，这些大型水电站绝大多数分布于西南地区。截至 2012 年底，中国已建大中型水电站装机容量 163 620MW，多年平均年发电量约 6500 亿 kW·h。

表 1　中国大中型水电站技术可开发量表

项目		单位	数值
大型水电站（300MW 及以上）	装机容量	MW	388 700
	多年平均年发电量	亿 kW·h	17 920
中型水电站（50～300MW）	装机容量	MW	87 730
	多年平均年发电量	亿 kW·h	3927
合计	装机容量	MW	476 430
	多年平均年发电量	亿 kW·h	21 847

发展趋势　从世界水能资源情况和开发现状来看，北美洲、欧洲、大洋洲等地区发达国家经济发展水平较高，大中型水电开发较充分，今后不再进行大规模开发，重点是已建水电

站的更新改造。亚洲、南美洲和非洲等地区发展中国家经济发展起点较低、发展速度较快，为适应经济发展需要，将加快大中型水电站建设步伐，成为大中型水电站开发的重点地区。

Danjiangkou Shuili Shuniu

丹江口水利枢纽 (Danjiangkou Hydroproject)

位于中国湖北省丹江口市汉江干流上，工程分两期建设。初期工程开发任务为发电、防洪、灌溉、航运、养殖等，装机容量900MW，多年平均年发电量38.3亿kW·h。大坝加高工程开发任务调整为防洪、供水、发电、航运。大坝加高工程为南水北调中线工程水源地，建设项目为大坝加高和水轮发电机组改造，总装机容量仍为900MW，多年平均年发电量33.78亿kW·h，见图1。以6回220kV出线接入华中电网，7回110kV出线向湖北省丹江口市、郧县和河南省淅川县供电。



图1　丹江口水利枢纽

水文和水库特性　坝址以上流域面积95 217km^2，多年平均径流量378亿m^3，多年平均流量1200m^3/s。工程按1000年一遇洪水设计，按10 000年一遇洪水校核。设计洪水流量64 900m^3/s，相应库水位初期工程159.80m，大坝加高工程172.20m；校核洪水流量82 300m^3/s，相应库水位初期工程161.30m，大坝加高工程174.43m。水库正常蓄水位初期工程157.00m，大坝加高工程170.00m；防洪限制水位149.00m；死水位初期工程139.00m，大坝加高工程150.00m。水库总库容初期工程209.7亿m^3，大坝加高工程339.1亿m^3；调节库容初期工程102.2亿m^3，大坝加高工程111.1亿～140.9亿m^3；死库容初期工程72.3亿m^3，大坝加高工程100亿～126.9亿m^3；防洪库容77.2亿m^3。为多年调节水库。

枢纽布置　枢纽工程由大坝、泄水建筑物、厂房、通航建筑物等组成，见图2。

大坝　包括左岸土石坝段、左岸连接坝段、厂房坝段、溢流坝段、深孔泄洪坝段、右岸连接坝段和右岸土石坝段等。初期工程，主坝坝顶高程162.00m，最大坝高97m，坝顶总长2494m，其中混凝土坝长1141m，两岸土石坝总长1353m。大坝加高工程加高后，坝顶高程176.60m，总长3442m，最大坝高117m。其中，混凝土坝长1141m，两岸土石坝总长2301m。枢纽布置与初期工程基本相同。大坝加高工程除新建长877m的右岸土石坝、左岸土石坝延长200m外，其余均在初期工程大坝基础上加高培厚而成，大坝加高14.6m。

泄水建筑物　深孔泄洪坝段设置11孔深水泄水孔。孔口宽5m、高6m，底坎高程113.00m，最大泄流量9680m^3/s。溢流坝段设20孔溢洪道。孔口宽8.5m、高22.5m，初期工程堰顶高程138.00m，大坝加高工程堰顶抬高至152.00m，最大泄流量39 900m^3/s。

大坝加高工程在上游距坝址30km处设两座灌溉取水渠首：陶岔渠首，引水流量350m^3/s；清泉渠首，引水流量100m^3/s。两座渠首引水高程均为146.50m。

厂房　坝后式厂房，厂内安装6台单机容量为150MW的竖轴混流式水轮发电机组，经埋设在坝内的6条直径为7.5m的压力钢管引水发电，6台机组最大引用流量1658m^3/s。水轮机转轮直径5.5m，额定转速100r/min，额定出力154MW，最高效率92.8%。发电机为伞式空冷型，额定电压15.75kV，额定容量176.5MV·A，额定功率因数0.85，定子铁芯内径12.8m。发电机电压侧采用发电机变压器组单元接线，高压侧采用双母线带旁路接线。220kV和110kV屋外开关站设在左岸下游台地上。

通航建筑物　布置在右岸。上段采用垂直升船机，初期工程最大提升高度50m，设计载重能力150t。下段为斜面升船机，轨道长350.00m，坡度1∶7。连同上下游导墙，过坝设施总行程1166m，设计年过坝运输量83万t。大坝加高工程对升船机系统进行了升级，位置和形式不变，设计载重能力300t，承船厢尺寸为37.0m×11.7m（干运）/28.0m×11.7m×1.4m（湿运）。扩建后的升船机推轮过坝时，年单向通过能力为96.2万t；推轮不过坝时，年单向通过能力为140万t。

工程施工　初期工程于1958年9月开工，1968年第一台机组发电，1974年竣工；大坝加高工程于2005年9月26日开工，2013年底完工。

综合利用　该电站为华中电力系统的主要电源之一，自

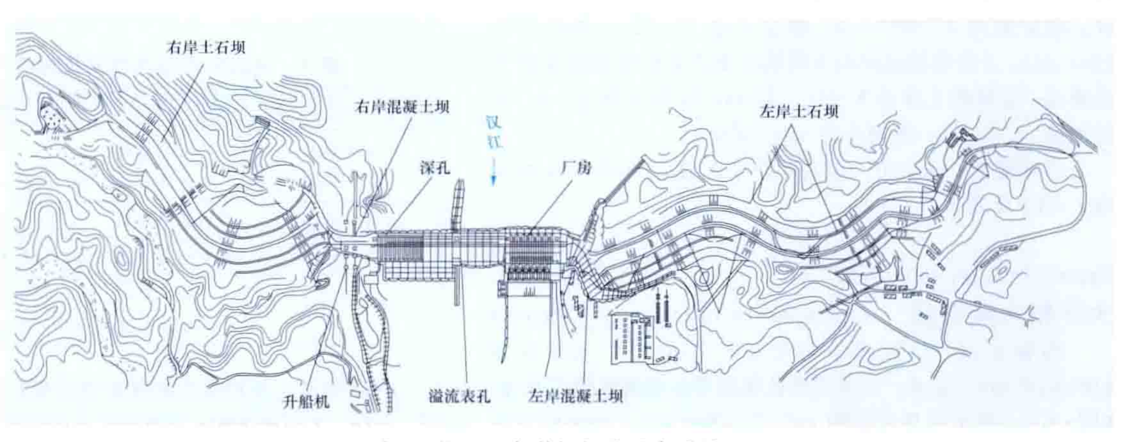


图2　丹江口水利枢纽平面布置图

1968年投产以来，发挥了调峰、调频和事故备用电源的作用。水库建成后，使下游河道防洪标准由6年一遇提高到20年一遇，配合分洪工程，可提高到100年一遇。100年一遇洪峰流量经调蓄后可由51 200m³/s减少到13 200m³/s。灌溉面积达到360万亩。上下游850km航道得到改善。

大坝加高后通过优化调度，可提高中下游防洪能力，扩大防洪效益；同时，作为南水北调中线的水源工程向北方调水，近期调水量95亿m³，后期调水量120亿～130亿m³，可基本缓解华北地区用水的紧张局面。

设计单位 长江流域规划办公室（现长江勘测规划设计研究有限责任公司）。

建设单位 南水北调中线水源有限责任公司为大坝加高工程建设单位。

dangshui jianzhuwu

挡水建筑物 （water retaining structure） 在水电枢纽工程中，具有拦截水流、壅高水位功能的水工建筑物。挡水建筑物拦截水流，形成具有一定库容的水库，对径流、洪水起调节作用，具有发电、防洪、供水等效益。挡水建筑物是枢纽中最主要的建筑物，其安全与工程效益、工程防洪度汛等直接相关，是工程蓄水、竣工安全鉴定和大坝安全定期检查等的主要对象。

按使用时间，可将挡水建筑物分为永久挡水建筑物和临时围堰挡水建筑物。永久挡水建筑物按不同的功用，分为非溢流挡水坝、溢流坝、开敞式泄水闸（节制闸、泄洪闸、排水闸、冲沙闸等）、岸边溢洪道控制段、泄洪洞进口、引水发电进水口、河床式厂房、船闸和升船机上闸首等。非溢流挡水坝包含重力坝、拱坝、支墩坝、空腹坝、碾压混凝土坝、土石坝、砌石坝等各类坝型。除非溢流挡水坝和无闸门控制溢流坝外，其余均需设置闸门参与挡水。

dangshui jianzhuwu weixiu

挡水建筑物维修 （maintenance of water retaining structure） 通过日常维护、缺陷维修，保证水电站挡水建筑物安全运行和正常功能发挥所采取的工程措施。挡水建筑物的维修主要指对大坝的维修。大坝由土石方、混凝土、金属结构等构成，可分为土石坝、混凝土坝等。

日常维护 根据水工建筑物运行维护规程，通过巡视检查和安全检测等手段发现问题，采取修补措施。维护内容包括清扫、表面缺陷处理等。

土石坝缺陷维修 主要是对滑坡、裂缝、渗漏等缺陷进行的维修。土工合成材料在土石坝缺陷维修中应用普遍，是一种新型的建筑材料，包括起防渗作用的土工膜，起反滤排水作用的土工织物，起加筋、排水、护面等作用的专门土工合成材料等。

滑坡 可能滑动面上的滑动力超过抗滑力而导致的失稳。运行期土石坝诱发滑坡的主要原因是孔隙压力升高致使土体抗剪强度降低，以及地震等附加载荷的作用。处理措施有抢险、减小滑动力和增大抗滑力、降低孔隙压力、防止砂土液化等。

（1）抢险。有滑坡预兆或已发生滑坡时，为防止事故进一步扩大采取的抢险措施，包括：坡顶减载；在滑动坡脚处用砂石料压重；当上游库水位降低时，可停止或放缓水位降落速度；对高水位时发生的下游滑坡，可降低上游水位，在下游面采取导渗措施降低浸润线的位置等。

（2）减小滑动力和增大抗滑力。减载、压重和放缓边坡。压重及补坡材料应尽量采用透水材料。在坡脚设抗滑键槽切断软弱层是增大抗滑力的措施。

（3）降低孔隙压力。通过加强防渗系统及下游排水设施降低坝体浸润线，增加高水位时下游坡的稳定性。可采取下游坝趾设排水沟、减压井以及垂直于坝轴线方向的水平排水孔等措施。

（4）防止砂土液化。采用振冲、挤密砂桩等方法，使松砂加密；采取排水减压措施，使振动孔隙水压力更快消散；采取压重及围封措施，增加砂体约束应力，限制液化砂体的流动。

裂缝 按成因可分为滑动、不均匀沉降、地震变形、水力劈裂、干缩等类型裂缝或多种因素的复合裂缝；按形态可分为纵缝、横缝、弧形缝、斜缝、水平缝和龟裂缝等类型，其中贯穿上下游方向的横缝、有滑坡先兆的弧形缝及水力劈裂形成的水平缝对大坝安全的影响最大。对尚未稳定的活动性裂缝，可能要反复处理或待变形稳定后再作处理。处理方法有开挖回填、灌浆、修建混凝土防渗墙等。

（1）开挖回填。对于浅表裂缝，可沿裂缝开挖沟槽后用黏性土料回填的方法处理；若是横缝，还需设置垂直于裂缝方向的结合槽。回填土料宜与原防渗体土料相近，在最优含水量附近用人工或机械压实，干容重宜比原坝体土略高。

（2）灌浆。按机理可分为充填灌浆和劈裂灌浆。灌浆材料多为纯黏土浆或掺入少量水泥的浆液。充填灌浆适用于走向明确、深度有限且有一定宽度的裂缝，一般采用自流或低压灌注，填满后因缝壁土料的吸水作用使泥浆固结。劈裂灌浆是利用水力劈裂原理，在一定灌浆压力下，使坝体内沿坝轴线方向（垂直于小主应力方向）产生一条连续竖向裂缝，对裂缝和与该裂缝连通的所有内部裂缝或孔洞进行浆液充填密实，从而在坝轴线方向形成一道连续的防渗泥墙。由于浆土间多次互压和坝体土的浸水压密，可改善坝体质量。

（3）修建混凝土防渗墙。对于裂缝、渗水及内部反滤层不良的土石坝，或对于重要工程，可在坝体内修建混凝土防渗墙进行加固处理，它还便于对坝基覆盖层一并处理。墙身材料常用黏土混凝土，此外还可采用塑性混凝土、固化灰浆、自凝灰浆等塑性材料，其变形性能对土石坝防渗体而言更为适应，技术效果好，但需用机械设备多，造价较高。而已有的薄防渗墙修建机具和技术，可以做到经济上合理。

混凝土面板堆石坝的面板和趾板混凝土裂缝处理原则与混凝土坝裂缝处理相同。

渗漏 对工程可能有3个方面的影响：渗漏量过大影响工程效益，甚至使水库不能蓄水；渗水压力和比降过大，造成管涌和流土等渗透变形或破坏，影响工程安全；抬高坝体浸润线，影响坝坡稳定。如果渗水通过反滤排水设施可有控排放，不会引起坝体或地基土的渗透破坏，而渗水量又不致影响工程效益，则属于正常渗流情况，不必进行处理；反之，可判断为异常渗流情况，应根据坝基地质情况、工程原有防渗排水系统、渗漏原因及工程要求，采取相应的防渗、排水或两者相结合的处理措施。

（1）坝体防渗。采用开挖回填、灌浆、混凝土防渗墙等

处理措施，与土石坝裂缝处理基本相同。对坝内反滤层质量不能满足要求、防渗体与基岩接触不良等情况，宜补做不冲刷材料组成的防渗体，如混凝土防渗墙等。

（2）砂砾石坝基防渗。（见软基处理）

（3）导渗措施。（见渗流控制）

（4）喀斯特及岩基渗漏的处理。（见岩基处理）

（5）集中渗流的防治。在土石坝下游坡面及地基有成股水流或泉眼型渗水，表明有集中渗漏通道存在，严重时往往出现浑水、坍坑、内部冲刷等险情，必须及时降低上游水位，并采取抢险措施。可采取的措施有：判断上游渗水入口，用砂石料或袋装土石料堵塞，再抛填黏土料闭气。在下游渗水出口处，先铺反滤料，再填砂石料阻止土料继续流失。如遇流速大、砂石料受冲刷的情况，可以修筑围井抬高下游水位，降低流速，然后在井中填反滤料及砂石料封堵，并将围井中渗水导出。险情排除后，应查清原因，进行彻底处理。

混凝土坝缺陷维修　主要对裂缝、渗漏、滑动和混凝土老化等缺陷进行的维修。

裂缝　混凝土在体积收缩受到约束、不均匀变形、温度、外载荷等因素作用下，拉应力超过抗拉强度就会产生裂缝。混凝土裂缝按其发展情况可以分为：稳定缝，由于外因消失或拉应力解除而不再发展；张缩缝，裂缝可因环境因素的变化（如冷热、干湿、外力的周期性变化等）而在一定范围内扩张和收缩；发展缝，由于外力作用而仍在发展之中，尚未趋于稳定状态。裂缝还可按其结构效应分为导致渗漏的缝、破坏结构或构件整体性的缝和起伸缩缝作用的缝等。对不同成因、形态及结构效应的裂缝，应采取不同的维修措施。一般情况下，稳定缝可以用刚性材料处理；张缩缝要用延伸率高的柔性材料处理，以适应其扩张和收缩，或在裂缝开度最大时作灌浆等处理；发展缝需在消除引起裂缝的外因或待裂缝稳定后再作处理，以免处理后又被拉开，必要时也可采取临时性的处理措施。对只引起渗漏问题的裂缝，可以用表面覆盖、镶嵌或灌注防渗性能好而强度要求不高的材料；对要求恢复结构整体性的情况，可灌注高强度材料及采取锚固等结构补强措施；对需要保留其伸缩性能的情况，可灌注弹性材料等。同时还需注意已有裂缝处理后，是否会在其他薄弱部位引起新的断裂。

（1）表面覆盖。包括：①喷涂。用水泥浆、水泥砂浆、沥青砂浆、环氧砂浆以及各种防水材料的浆液喷射或涂抹在混凝土表面，必要时还可采取挂钢丝网或钢筋网再喷浆的措施处理。②粘贴或锚压。将表面凿毛或凿宽浅槽，清理干净后用胶黏剂将土工薄膜、橡胶布等防渗薄膜粘贴或锚压在裂缝部位的表面，起封闭作用。③镶嵌。在裂缝表部凿成V形或梯形槽，在槽内嵌入能与混凝土黏结而又具有良好延伸性的柔性材料，如沥青油膏、聚氯乙烯胶泥、非硫化橡胶及其他高分子材料，表面再用水泥或环氧砂浆抹平保护。水下环氧技术使某些混凝土缺陷可以在水下用潜水技术处理。

（2）灌浆。对有一定深度的裂缝以及内部裂缝，可用灌浆处理。一般宽度大于0.3mm的裂缝，可用水泥灌浆处理；宽度小于0.3mm的裂缝，可用化学灌浆处理。化学浆液可灌注0.1mm甚至更细的缝，超细水泥灌浆也可用于细缝处理。化学灌浆材料品种很多，适用于各种情况。防渗堵漏可用丙凝、丙烯酸盐、聚氨酯等；需适应裂缝张缩时可用弹性聚氨酯、水溶性聚氨酯等弹性材料；需恢复结构整体性时可采用改性环氧树脂、甲凝、聚氨酯等高强材料。酸性水玻璃浆液稳定性较碱性水玻璃好，可以在永久性工程中试用。灌浆处理后的裂缝表面常作覆盖处理。

（3）结构补强措施。对影响结构整体性和承载能力的裂缝，或受力较大部位的裂缝，除灌浆处理外，还可采用锚筋、预应力锚索、骑缝钢板锚固、挂钢筋网喷混凝土等结构补强措施。

渗漏　坝体渗漏的主要通道是裂缝及混凝土的质量缺陷，其封堵方法主要是表面处理和灌浆。对大面积渗漏，可在上游面补做沥青混凝土、钢筋混凝土、土工薄膜的防渗层。坝基及绕坝渗漏除有喀斯特等集中渗流通道的情况外，主要是引起扬压力升高而使抗滑安全度降低，甚至失稳。其原因大都是原有灌浆帷幕质量不好或者年久失效，下游排水系统不足或堵塞失效。可根据观测结果的分析，采取相应措施：灌浆帷幕失效时需进行补强，防渗要求较高时可采用两排水泥灌浆中夹一排丙凝或聚氨酯灌浆处理，用水泥灌浆封堵大裂隙，再用化学灌浆堵塞细微裂隙，既可收到更好效果，也可节省昂贵的化学浆材，已有成功经验；下游排水系统对降低扬压力十分有效，如原有排水孔洞堵塞失效，可设法疏通，也可增设排水孔、排水洞组成排水帷幕，以改善排水条件；遇泥化夹层等可冲刷材料时，可在排水孔内设反滤材料。

滑动　主要有沿混凝土与基岩接触面滑动和沿基岩内的软弱结构面滑动两类。滑动原因有超载、高扬压力、基岩内软弱夹层软化、下游抗力体被冲刷掉等，要按其原因而采取相应的处理措施。出现潜在滑动危险时，要采取降低上游水位、排水降低扬压力等临时应急措施，然后再研究处理。处理方法主要是增加有效应力和增加潜在滑动面上的抗剪力，如加大坝的断面、加强帷幕和排水甚至抽排以降低扬压力、混凝土与基岩面的接触灌浆、预应力锚索、加固下游抗力体以提高其抗力、切断软弱结构面的钢筋混凝土键、大型抗滑桩等。（见岩基处理）

混凝土老化　混凝土受到冷热、冻融、干湿、溶蚀、碱骨料反应、炭化等作用，在长期运行过程中丧失或降低其强度和抗冲抗渗能力。一般老化现象以表浅部位为主，常以表层处理作为补强措施，以恢复混凝土表层的完整、平整和提高其耐久性。采取的措施包括挖补、喷砂浆或喷混凝土、压浆混凝土、表面加设防渗层和灌浆等。

（1）挖补。将表面风化剥蚀层及蜂窝麻面等凿除后用水泥砂浆或混凝土填补抹平。必要时可采用环氧砂浆、环氧混凝土、硅粉混凝土等高强耐蚀材料。

（2）喷砂浆或喷混凝土。可采用无筋的，也可挂钢筋网或钢丝网，适用于较大面积的修补。

（3）压浆混凝土。预先将混凝土骨料填于需修补部位的模板内，通过预埋的灌浆管，将水泥砂浆注入骨料空隙，填塞密实而成高质量的混凝土，适用于不便浇捣的部位。

（4）表面加设防渗层。

（5）灌浆。整体混凝土老化一般用灌浆方法处理。

金属结构维修　见水工金属结构维修。

daobaoguan

导爆管　（nonel）　由雷管或击发枪引爆，管内壁涂有高敏感性炸药以高爆速引爆雷管的一种导爆器材。导爆管

外观呈乳白色，是在灰色半透明的热塑性塑料软管内壁涂上一薄层高敏感猛性炸药和工业附加物而形成（见图），爆速1600～2000m/s，用明火不能引爆，抗冲击，作用可靠，质量小，运输方便，保管安全，对周围环境无影响，能抵抗一切杂散电流。导爆管是20世纪70年代开始发展的爆破器材，除不适用于有瓦斯或矿尘爆炸危险的地下工程外，可供任何爆破作业使用，广泛应用于水电工程爆破中。

导爆管按其抗拉强度分为普通导爆管和高强度导爆管。普通导爆管由一般热塑性塑料制成，抗拉强度较低。高强度导爆管是对导爆管管壁材料进行改性，或采用复合层管壁材料。复合层管壁导爆管主要有双层导爆管、三层和多层导爆管。



导爆管

导爆管的作用过程是在用击发枪或雷管引爆后，管壁炸药在瞬间分解，产生爆轰波，根据管道效应原理，不断激发管壁炸药的化学反应，补充传播过程所耗能量，稳定地沿着管道向前推进，使整个管道呈白光，声响不大，管壁无破损，手感有轻微脉动，直至引爆导爆管末端的雷管，再由雷管引爆炸药。在组织爆破网络时，可用装有导爆管的连接块连接，或将两段管口对接后用胶布裹好，同样可以导爆。

daobaosuo

导爆索 （detonating fuse） 可以直接引爆与其接触的炸药或传爆器材的、由高敏感性炸药卷成的索状起爆传爆器材。又称爆炸导火索或传爆线。根据用途可分为一般爆破作业的露天导爆索和用于有瓦斯或矿尘爆炸危险的安全导爆索。

露天导爆索有普通导爆索和低能导爆索，以及用于水环境的高抗水导爆索、强起爆力导爆索等。水电工程中常使用的是普通导爆索。普通导爆索与导火索相似，只是芯药采用威力大、爆速高的高敏感猛性炸药，外层涂丹红色或灰白与丹红相间色以与导火索区别，按结构分为棉线导爆索和塑料导爆索两类，爆速约6500m/s；低能导爆索是一种药芯药量很小（一般每延米药量小于5g）的导爆索，一般不能直接引爆炸药，只用于敷设炮孔外的导爆索网络，起传爆作用；高抗水导爆索表面包覆具有高抗水能力的化学材料，两端密封较好，主要用于深水爆破；强起爆力导爆索药芯药量大，一般在25～40g/延米，性能与低能导爆索相反，主要用于特殊爆破。

导爆索必须用雷管等有足够能量的爆轰（即猛性炸药瞬间分解时对周围产生巨大破坏作用的能量）才能引爆。用导爆索起爆药包时，可以单个连接，也可以连接成导爆索网络。

daohuosuo

导火索 （blasting fuse） 用明火点燃引爆火雷管和黑色炸药的索状引爆器材。导火索以黑火药作芯药，用涂有防潮剂的纸条包裹，外缠麻、棉线，表面呈灰白色，正常燃速100～120s/m。按适用场合不同，导火索有普通型、防水型和安全型3种。

小型爆破作业中可用导火索起爆药包。导火索的长度要能保证点炮人员在燃完规定的导火索后撤退至安全地点，且不短于1.2m。导火索用专门点火用的导火索或点火棒、点火筒点火。导火索不宜用于竖井、斜井、深孔及有瓦斯和矿尘爆炸危险的地下工程。导火索由于其性能和使用方面的限制，一般爆破作业中应用较少。

daoliu dikong

导流底孔 （diversion bottom outlet） 在坝体内设置的用于主体工程施工期导流度汛的临时泄水孔。当采用断流围堰导流时，常作为中后期导流的泄水建筑物；当采用分期围堰导流时，常作为二期工程的导流泄水建筑物。导流底孔在完成导流度汛任务后，须按坝体应力要求全孔回填与坝体混凝土强度等级相同的混凝土，对孔壁混凝土应先凿毛，埋设插筋，使回填混凝土与坝体混凝土良好结合。

导流底孔可单独泄流，也可与坝体预留缺口等联合泄流。底孔断面形式有城门洞形、矩形或圆形，多采用矩形断面。导流底孔设置数量、高程及其尺寸，应兼顾导流、截流、排冰及水库下闸蓄水等要求。利用永久泄洪、排沙和水库放空底孔兼作导流底孔时，应同时满足永久和临时使用要求。导流底孔一般宜设置在溢流坝段，以便利用消力池或护坦作为出口的消能防冲措施。底孔与坝体缺口宜错开布置；当不能错开时，应处理好顶部溢流与底孔出流的水力学关系。设置导流底孔时，力求水流平顺，加大流量系数，提高宣泄能力，防止下游冲刷。

中国水口水电站在溢流坝段内布置了10个8m×15m（宽×高）的导流底孔，在三期导流期间与溢流坝段缺口双层泄流。巴西伊泰普水电站在导流明渠坝段中设置了12个6.7m×22m（宽×高）的贴角矩形底孔，在同一高程上跨缝和跨中交错布置。中国长江三峡水利枢纽在泄洪坝段跨缝设置了22个6.5m×8.5m（宽×高）的导流底孔，在底孔出口安装弧形闸门，调控水库初期发电水位。

daoliu hanguan

导流涵管 （diversion culvert） 在坝基部位设置涵管穿过基坑和上、下游围堰，作为采用断流围堰导流方式的泄水建筑物，或分期围堰导流方式的后期导流泄水建筑物。可用于导流流量不大的中、小型土石坝工程，多应用于抽水蓄能电站上水库的施工导流。导流涵管在导流任务完成后进行封堵或改建为永久工程使用。

导流涵管一般在坝下，布置在岸边表露的基岩漫滩或河床上，常采用钢筋混凝土结构或浆砌石修建。在某些情况下，还可在建筑物岩基上开出一条沟槽，做好衬砌，顶部加上混凝土或钢筋混凝土顶盖而形成涵管。当涵管设在软基上时，须对管道结构及基础采取加固措施，分段设置伸缩缝，避免涵管由于产生不均匀沉陷和温度应力而引起裂缝；同时，要注意涵管与坝基结合，做好防渗措施，防止沿涵管渗漏，引起失事。涵管轴线宜顺直，进出口要求与隧洞、底孔的要求相同，应有良好型式，使水流顺畅，

不产生冲刷或淤积，出口消能防冲措施要可靠。涵管的断面常采用城门洞形，断面尺寸应满足施工期导流及度汛要求，并考虑围堰高度与管径之间的关系，经综合技术经济比较确定。

中国柘林水电站为涵管导流的典型工程之一，导流流量1650m³/s，布置1条导流涵管，长度为234m，断面尺寸为9m×12.2m（宽×高）。

daoliu mingqu

导流明渠 （diversion channel） 在河道岸边开挖形成的用于主体工程施工期宣泄河道水流的临时性泄水渠道。一般适用于岸坡较缓、有较宽阔的滩地或有老河道、垭口、河弯等可资利用地形地质条件的河道上。导流明渠过流能力大，施工比较简便，有利于加快施工进度，并易于解决施工期通航、排冰等问题。导流明渠一般均通过修建坝体的部位，施工后期应按主体建筑物结构要求进行改建或封堵。

导流明渠的布置，应尽量减少弯道，力求水流顺畅。应避开滑坡、崩塌体等地质不良地段及高边坡开挖区，保证泄水安全，并使挖填方量小、施工方便。导流明渠一般均布置在一岸，进出口轴线与河道主流方向的夹角宜小于30°，避免泄洪时对上、下游沿岸产生冲刷。明渠伸出上、下游围堰外坡脚的距离应满足堰基防冲要求。导流明渠断面多采用梯形或矩形，明渠底宽、底坡和进出口高程应使上、下游水流平顺衔接，并满足导流、截流和施工期通航、排冰的要求。导流明渠的衬砌形式一般有现浇混凝土、喷混凝土、浆砌石、预制混凝土板、钢筋石笼等，具体衬砌形式须根据导流明渠的地质条件、工作条件、明渠内水流流速等综合分析确定；当地质条件较好时，导流明渠可不衬砌或局部衬砌。导流明渠出口部位应采取防冲保护措施，防护措施一般有修建混凝土齿墙，浇筑钢筋混凝土柔性板，设置沉井，抛大块石、钢筋石笼等。

中国长江三峡水利枢纽导流明渠设计导流流量为83700m³/s，明渠长3410m、宽350m，总开挖量2138万m³；当流量小于20000m³/s时，明渠通航。中国水口水电站导流明渠设计流量32200m³/s，明渠长1170m、宽75m，总开挖量约300万m³，明渠水深24～38m，平均流速10～13m/s；当流量为300～2700m³/s时通航，通航流速为3～4m/s。

daoliu quekou

导流缺口 （diversion opening） 在混凝土坝或浆砌石坝上预留的具有一定宽度的缺口，可作为中、后期施工度汛的临时泄水建筑物。导流缺口常与其他导流泄水建筑物联合泄洪度汛。

导流缺口应布置在水流条件和地基抗冲条件较好的部位，防止对围堰及其他建筑物的冲刷；以集中布置为佳，一般布置在主河床部位，避免下泄水流冲刷岸坡。经分析论证并采取必要的工程措施后，缺口也可布置在岸边坝段。缺口宽度根据下泄流量、坝体结构、下游消能防冲要求、施工进度等因素综合分析确定。高坝设置导流缺口泄洪时，应妥善解决缺口水流流态、下游防冲及过流时引起的振动、过流面混凝土防裂等问题。当采用缺口与底孔联合泄流度汛时，应合理布置缺口和底孔，并采取工程措施防止底孔发生空蚀破坏。

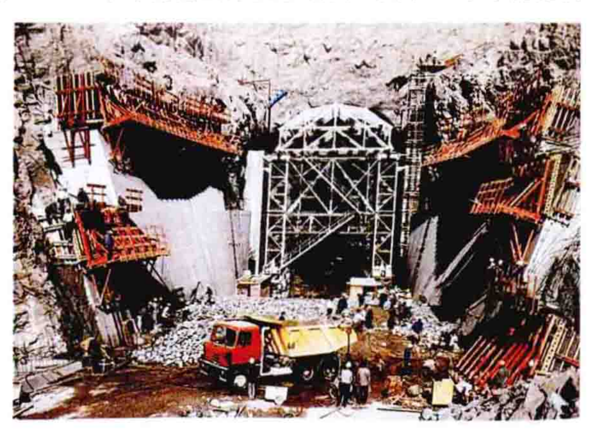
中国澜沧江功果桥水电站采用枯水期导流隧洞导流、汛期导流隧洞与大坝缺口联合度汛的导流方案，度汛流量为7710m³/s；缺口布置在左岸岸边坝段，宽67m，宣泄流量4210m³/s，缺口内最大水深11.5m、最大流速10.77m/s；下游基坑左岸岸坡采用护坡混凝土与预应力锚索加固处理。

daoliu suidong

导流隧洞 （diversion tunnel） 在河道岸边山体内开挖形成的用于主体工程施工期宣泄河道水流的临时性泄水隧洞。一般适用于河谷狭窄、两岸岸坡陡峻、岩体地质条件较好的山区河流上。导流隧洞造价较高，所以尽可能将其改建为永久建筑物。专用的导流隧洞，在导流任务完成后应进行封堵。

导流隧洞宜布置在地质条件较好的岩层中，一般尽量避免洞线穿过不良地质构造及较大的冲沟；无法避免时，则使洞轴线与断层、破碎带走向的交角尽量大一些。隧洞进出口一般布置在岸坡岩体地质条件较好的部位，以利于洞口稳定。导流隧洞轴线的选择应尽可能使水流顺畅，宣泄能力强。其进、出口与上、下游围堰间应有足够的距离，以防堰基受水流冲刷。隧洞进出口高程的确定，应兼顾导流、截流、通航等要求，并考虑洞身施工时出渣、排水等因素，使进出口水流衔接良好，便于施工。隧洞出口应采取消能防冲措施，消能方式一般有挑流鼻坎消能、消力池消能及扩散消能等。导流隧洞断面形式主要取决于地质条件、隧洞工作条件和施工条件，以及是否有利于截流等因素，常见的有圆形、马蹄形及城门洞形3种。隧洞断面尺寸主要取决于地质条件与导流流量，此外还要考虑围堰高度与洞径之间的关系，通过综合比较，选择最佳洞径。导流隧洞是否需要衬砌，根据地质条件及隧洞工作条件而定，地质条件较好、过流流速不高或后期不改建为永久工程使用的导流隧洞，洞身段一般可不衬砌、喷锚支护或局部衬砌。

中国雅砻江二滩水电站，导流流量为13500m³/s，左、右岸各布置1条导流隧洞，城门洞形断面，断面尺寸为17.5m×23m（宽×高），见图；中国澜沧江糯扎渡水电站，导流流量为17400m³/s，左、右岸分高程布置5条导流隧洞，1～3号导流隧洞为城门洞形断面，最大断面尺寸为16m×21m（宽×高），4、5号导流隧洞为圆形断面，其中5号导流隧洞与



二滩水电站导流隧洞出口施工

泄洪洞结合；中国溪洛渡水电站，导流流量为32 000m³/s，左、右岸各布置3条城门洞形断面的导流隧洞，断面尺寸达18m×20m（宽×高）。

daoliu suidong fengdu

导流隧洞封堵 （plugging of diversion tunnel）

对已完成导流任务的导流隧洞进行封堵的工作。主要工作内容包括在导流隧洞进出口挡水、洞内排水、修建堵头。导流隧洞封堵时间一般安排在汛后枯水期，在封堵工程施工期，其进出口封孔建筑物的挡水标准为5～20年重现期。

进出口挡水　导流隧洞进出口挡水方式有设置封孔闸门、围堰挡水、定向爆破堵口等。隧洞进口常用的挡水方式为封孔闸门，闸门类型有钢闸门、钢筋混凝土叠梁门、钢筋混凝土整体闸门。钢闸门结构可靠，常用于大中型中高水头水电工程；钢筋混凝土叠梁门起吊力小，操作简单，常用于低水头工程；钢筋混凝土整体闸门较钢闸门造价低，但闸门重，起吊、沉放困难。隧洞出口常采用修筑围堰挡水的方式。

洞内排水　导流隧洞进出口封孔堵漏后，首先采用水泵排出洞内积水，然后在堵头上、下游各设置一道挡水子围堰，并埋设排水钢管，将上游渗水排向下游并由水泵排出洞外，创造封堵堵头干地施工条件。排水钢管应设置阀门，并在堵头施工后期回填混凝土封堵。

修建堵头　导流隧洞堵头为一定长度的混凝土塞，一般布置在坝基下部防渗帷幕轴线部位。堵头的形式有楔形体、棱柱体、拱形及球壳体等。楔形体堵头能将压力较均匀地传递至洞壁岩体，受力情况好，长度较棱柱体堵头短，被广泛采用。棱柱体堵头长度较长，工程量较大，多用于洞壁围岩地质条件较差的导流隧洞封堵。拱形及球壳体堵头工程量较小，但对洞壁围岩地质条件要求高，结构复杂，施工有一定难度。堵头为永久建筑物，与大坝级别相同，长度应满足稳定及运行安全要求，堵头部位洞壁岩体应进行固结灌浆。堵头混凝土可使用低热微膨胀水泥，有利于简化混凝土温控措施，防止产生混凝土裂缝。堵头施工一般采用分段分层浇筑，并埋设冷却水管对混凝土进行冷却，当混凝土温度降至稳定温度时，对缝面进行接缝灌浆。为使新老混凝土良好结合，须首先对洞壁衬砌混凝土进行凿毛处理，埋设插筋或设置键槽；在堵头混凝土冷却到稳定温度后，还需对堵头混凝土与衬砌混凝土接触面或与岩石接触面进行接触灌浆。堵头一般在导流隧洞开挖时预挖成型，导流隧洞封堵时不再二次开挖。由于导流隧洞进口底板高程一般较低，泥沙及石渣难免进洞，导流隧洞底板混凝土常产生磨蚀损坏，为保证导流隧洞堵头安全施工，可采用在堵头前设置临时堵头的工程措施。

daoliu xieshui jianzhuwu

导流泄水建筑物 （diversion structure）

在施工导流过程中将河水导向下游的泄水建筑物。导流泄水建筑物一般为临时性建筑物，常用的有导流隧洞、导流明渠、导流底孔、导流涵管、导流缺口等。

为节约工程投资，导流泄水建筑物与永久泄水建筑物应尽可能结合布置，或在完成导流任务后改建为永久泄水建筑物：泄洪闸、坝身泄洪深（中）孔、排沙洞、泄洪洞、发电水道等永久建筑物，在工程施工过程中也可作为导流泄水建筑物使用。

daoshui jigou

导水机构 （water guide mechanism；distributor）

引导水流和调节水轮机流量的机构，包括顶盖、底环、导叶及其操作机构等。混流式水轮机和轴流式水轮机导水机构引导水流径向流入水轮机，灯泡式和斜流式水轮机导水机构引导水流斜向流入水轮机，全贯流式水轮机导水机构引导水流轴向流入水轮机。混流式水轮机导水机构见图1。

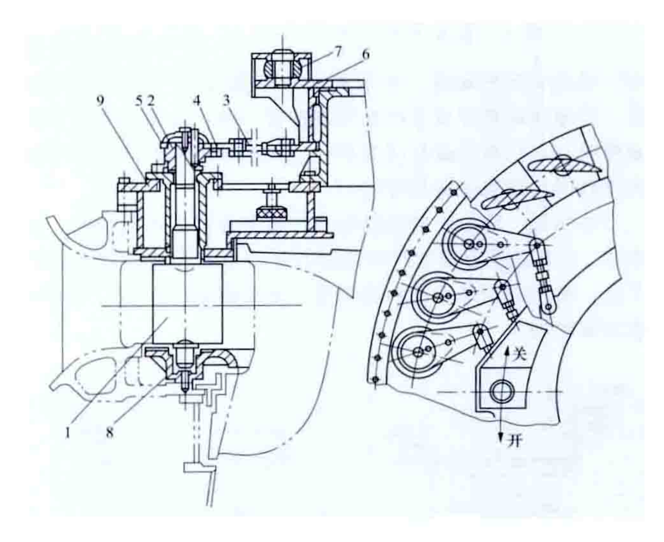


图1　混流式水轮机导水机构

1—导叶；2—拐臂；3—连杆；4—剪断销；5—连接板；6—控制环；7—推拉杆；8—底环；9—顶盖

导叶　引导水流和调节流量的流线型零件，由流线型导叶体及上、中、下轴颈组成，见图2和图3。高水头中小型机组中，为便于装拆和调整，可取消下轴颈。为减少水力损失，导叶体过流表面须有足够的光洁度。导叶有对称型和非对称型两种。为防止或减少导水机构漏水，设有导叶轴承的止漏装置、导叶与导叶之间和导叶与上、下环间的止漏装置。中高水头水轮机的导叶立面间隙用金属接触密封，低水头的用橡胶带密封。导叶材料应有良好的抗空蚀和泥沙磨损性能，一般采用铸钢整铸，也有用钢板压成中空导叶体后再和轴颈组焊的。为提高导叶的抗磨蚀性能，必要时用不锈钢制造，或在密封面和

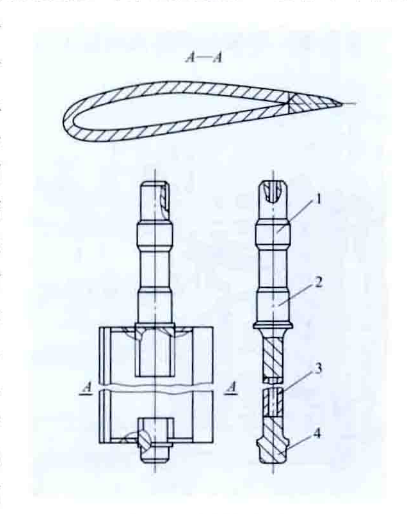


图2　焊接导叶

1—上轴颈；2—中轴颈；3—导叶体；4—下轴颈

轴颈处堆焊不锈钢。导叶轴承可用铸锡青铜制造、黄油润滑，也可采用有自润滑性能的钢背复合工程塑料轴瓦。


图3 安装完毕的导叶

导叶传动机构 由拐臂、连杆、控制环等组成，控制环通过连杆、拐臂等带动导叶转动，开关导叶，其主要型式有叉头传动机构和耳柄传动机构。为了保护传动机构不受损坏，还设有保护装置。常用的保护装置有剪断销、破断螺栓、摩擦传动拐臂或塑性易弯拐臂等几种，当导叶之间卡有异物时，它们首先破断或变形；后面两种还具有防止导叶自由摆动引起连锁反应的性能。

控制环 将接力器的操作力传递给连杆的环形部件，见图4。它有和接力器推拉杆连接的耳环以及和连杆连接的销子孔。常用铸钢铸造或钢板焊接，受运输条件限制，可设计成分瓣结构。

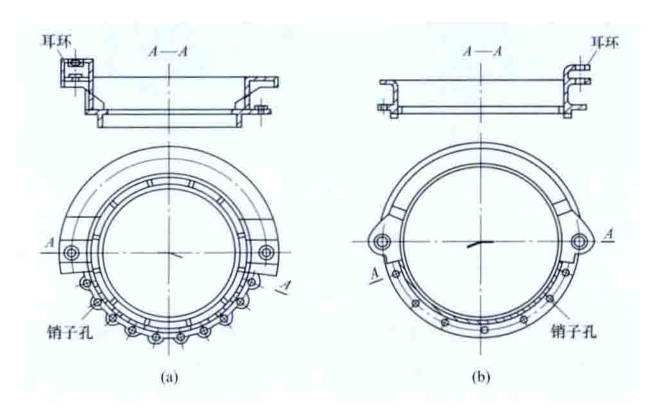


图4 控制环

(a) 焊接结构；(b) 铸造结构

接力器 将调速器输出的压力油能转变为操作导叶传动机构机械能的部件。小型水轮机由调速器内的接力器直接驱动调速轴操作导叶传动机构，大中型水轮机配有专门的接力器操作导叶传动机构。接力器有直缸、环形、摇摆几种类型。多数机组采用两个接力器，小型机组也有采用一个接力器的，个别机组每个导叶配一个接力器（多见于抽水蓄能机组）。典型的直缸接力器见图5，它由接力器缸、后缸盖、前缸盖、导管、锁锭、活塞、活塞杆等组成，分别用铸铁、铸钢或锻钢制造。额定操作油压一般采用2.5、4.0MPa及6.3MPa等。

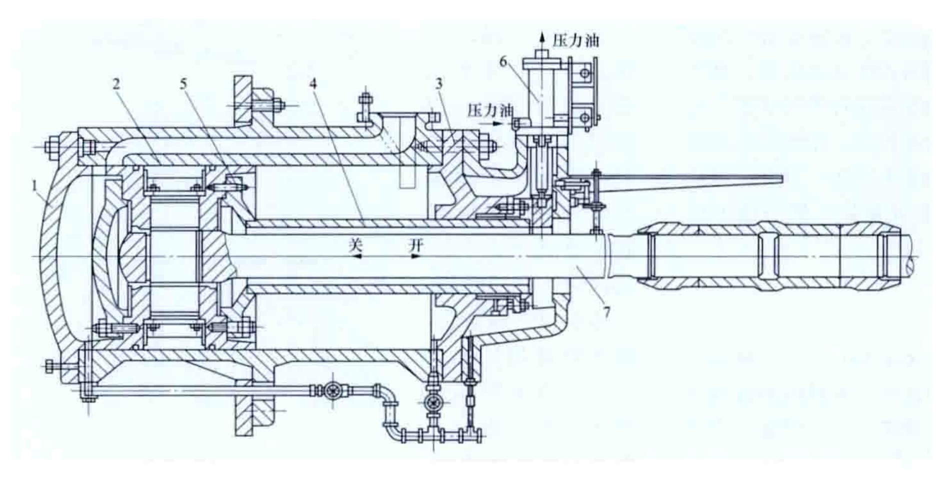


图5 直缸接力器

1—后缸盖；2—接力器缸；3—前缸盖；4—导管；5—活塞；6—锁锭；7—活塞杆

dengpaoshi shuilun fadianji

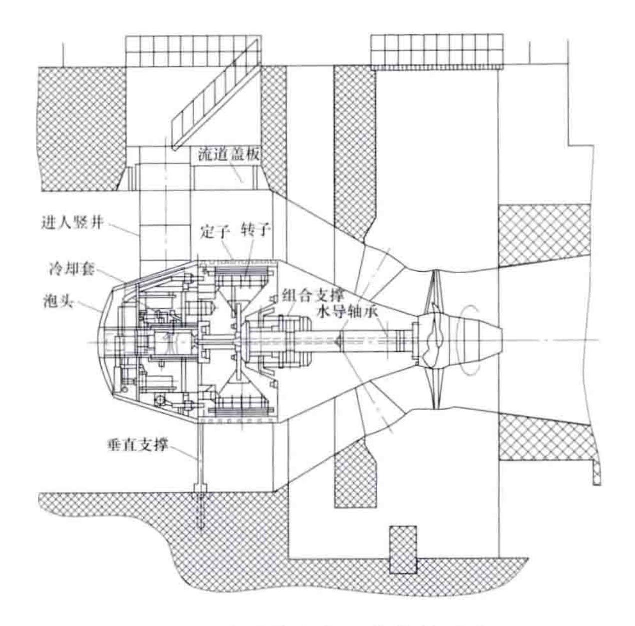
灯泡式水轮发电机

(bulb hydro-generator) 将发电机与轴承等布置在形似灯泡的密封壳体内的水轮发电机。灯泡式水轮发电机与水轮机直轴连接并布置在水下流道内，其特点是结构布置紧凑、复杂，具有防潮、防漏等特殊要求。由于灯泡式水轮发电机装在水下，停机时绕组容易受潮，为了安全可靠，发电机额定电压比一般水轮发电机低。

灯泡式水轮发电机因受灯泡比的影响，发电机直径一般较小，转子励磁绕组极间空间位置也小，励磁安匝数受到限制，通常选用较高的功率因数，一般额定功率因数不低于0.875，有些电站达到0.95及以上。此外，灯泡式机组的水轮发电机飞轮力矩及惯性时间常数较小，故机组甩负荷时的转速上升率较大，一般大于45%，飞逸转速可达额定转速的2.5～3.5倍。与同容量立式水轮发电机相比，水轮机的转轮直径可缩小，因此灯泡式机组的额定转速可提高10%以上，发电机内径可减少25%以上，整个机组的质量（包括水轮机）可减轻25%，是开发低水头水力资源最经济适宜的一种机型，多用于工作水头范围为2～25m的低水头水电站。灯泡式水轮发电机组结构剖面见图。

灯泡比 定子机座外径与水轮机转轮外径的比值称为灯泡比。它是灯泡式水轮发电机组的一个重要特征参数，通常取0.8～1.2。灯泡比过大，将使水轮机的水力特性变坏，机组效率降低；灯泡比过小，将使铁芯长度增加，导致转子结构布置困难，飞轮力矩减小，甩负荷时转速上升率增大，对通风散热不利。

冷却方式 通常采用带风机常压强迫循环、铁芯贴壁冷却或增压强迫通风冷却方式。灯泡式机组由于转速低、直径小、定子铁芯长度大，由转子和风扇等部件所产生的风压较常规水轮发电机低很多，采用常规的自通风冷却方式很难满足要求，因此需采用带风机的强迫循环（轴向或轴、径向）或带冷却套冷却，以及绕组内部直接通水的通风冷却方式，还可采用定子铁芯贴壁冷却或增压强迫通风冷却。定子铁芯贴壁冷却是指定子铁芯采用贴壁结构，直接将热量传给河水，利用水流带走灯泡体散发的热量。增压强迫通风冷却是在灯泡体内充压，增强散热能力，可提高机组的综合效率并降低灯泡比，但需增设充压设备和提高



灯泡式水轮发电机组结构剖面图

泡体的密封性能，通常增压的最优压力取0.2～0.3MPa。

简史　1936年，瑞士设计了第一台灯泡式水轮发电机，安装于波兰路斯汀（Rostin）水电站。20世纪50年代，法国、日本、苏联、挪威等国家建成一批灯泡式水电站。1978年，美国在哥伦比亚河上的石岛（Rock Island）水电站安装了额定容量为54MW的灯泡式机组。1989年，日本只见（Tadami）水电站制造了额定容量为65MW的灯泡式机组。

中国制造的第一台40kW灯泡式水轮发电机于1964年投入运行，1983年在马迹塘水电站投产3台18.5MW的进口灯泡式机组，1984年在白垢水电站投运了额定容量为10.47MW的国产灯泡式机组。1998年，中国自行设计制造了四川红岩子水电站30MW灯泡式机组。2007年，长洲水利枢纽额定容量为42MW的机组转轮直径达7.5m，为中国最大。2008年，桥巩水电站投运额定容量为57MW的灯泡贯流式机组。2012年，中国出口巴西杰瑞（Jirau）水电站的18台单机额定容量为75MW的水轮发电机投运，为世界最大的灯泡贯流式水轮发电机。

Dinuoweike Choushui Xuneng Dianzhan

狄诺维克抽水蓄能电站　（Dinorwig Pumped Storage Power Station）　位于英国威尔士东北部班戈尔（Bangor）市的南面。电站装机容量1800MW，输电电压400kV。当系统中2台660MW大型火电机组同时发生事故时，可在10s内投入1320MW备用容量。作为系统主要调频电站，可使系统频率控制在49.5～50.2Hz范围内。电站还承担黑起动任务。

枢纽布置　枢纽工程由上水库、下水库、水道系统、厂房等组成，见图1和图2。

上水库和下水库　建坝壅高马奇林（Marchlyn）湖水位作为上水库，正常蓄水位633m。另建坝壅高佩里斯（Peris）湖水位作为下水库，正常蓄水位106.00m。上、下水库各有调节库容670万m^3，进行日循环运用。抽水6.5h，可供发电5h。两湖之间距离3.2km，利用水头494～541m。上水库建堆石坝，最大坝高68m，沥青混凝土护面；下水库筑土石坝，最大坝高35m。



图1　狄诺维克抽水蓄能电站下水库

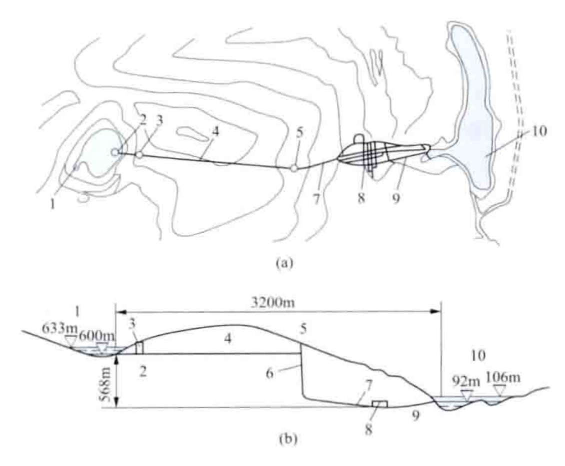


图2　狄诺维克抽水蓄能电站总体布置

(a) 平面示意图；(b) 水道纵剖面

1—上水库；2—进水口；3—闸门井；4—低压隧洞；5—调压井；6—竖井；7—高压隧洞；8—地下厂房；9—尾水隧洞；10—下水库

水道系统　1条直径10.5m、长1695m的低压隧洞引水，然后接入调压井及直径10m的竖井，深412m，最后接直径为9.5m的高压隧洞，长530m。6条直径3.8m的压力管道，长400m，下端90m用钢板衬砌。尾水洞前段直径4.5m，共6条；后段合成3条，直径8.5m。前后两段共长520m。

厂房　地下主厂房长180m，宽24m，高51m，埋深450m。安装6台可逆式抽水蓄能机组。混流式水泵水轮机的转轮直径3.8m，转速500r/min。水轮机工况下，额定水头为535.8m时，出力317MW。水泵工况下，额定扬程为496.4m时，抽水流量55.2m^3/s。6台最大抽水流量可达390m^3/s。发电电动机单机容量330MV·A，电压18kV。主变压器洞设在厂房下游，通过2回400kV超高压电缆送至地面。

工程施工　工程于1974年开工，1982年12月开始投入，1984年完成。

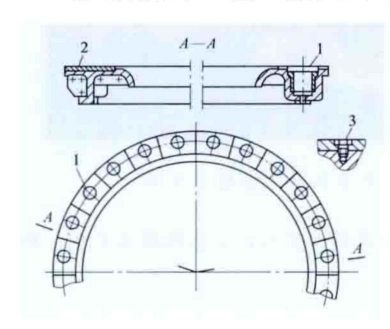
主要工程量和投资：隧洞和竖井总长累计达16km，地下厂房和变压器室等开挖石方总计达135万m^3。1976年估价为2.28亿美元。1984年建成时造价达6.25亿美元，单

位投资 347 美元/kW。

dihuan

底环 (discharge ring; bottom ring) 支持导叶下轴颈并构成过流表面的扁平状环形部件，见图。一般用铸钢铸造，大型底环也可用钢板焊接；受运输条件限制，可分为两半或多瓣组合。

底环固定在座环上，它有与导叶数目相等的轴孔，供装设导叶下轴承用；少数高水头水轮机导叶高度小，也有不设下轴承的。有的混流式水轮机底环和转轮下环止漏环相对的位置上装有固定止漏环。底环和导叶下端面之间采用橡胶带密封，高水头水轮机也可直接采用间隙密封。除整体不锈钢板底环外，大多数底环过流表面都铺设抗磨板，或者直接铺焊抗磨层。



水轮机底环

1—导叶下轴孔；2—下抗磨板；3—抗磨板把合方式

轴流式水轮机的底环上设有装拆时悬挂转轮的凹槽，安装后盖板封闭。

dili xinxi xitong

地理信息系统 (geographic information system, GIS) 在计算机硬件、软件和网络技术支持下，将各种地理信息按照空间分布及属性，以一定的格式输入、存储、检索、更新、显示、制图、描述和综合分析应用的技术系统。GIS 按研究的范围大小可分为全球性 GIS、区域性 GIS 和局部性 GIS，按研究内容的不同可分为综合性 GIS 与专题性 GIS。在水电工程的区域构造稳定性研究、库区移民调查、地质灾害调查、施工质量控制、运行管理等方面均得到应用。GIS 的建立方法主要有结构化生命周期法、由底而上法、快速原型法、面向对象软件开发方法、DADM 演示和讨论法等几种。

系统开发过程　GIS 开发过程包括 4 个阶段：①需求调查与分析阶段（需求调查与分析、可行性分析、数据收集和系统分析）；②系统设计阶段（总体设计、详细设计）；③系统实施阶段（软硬件配置与准备、人员培训、数据采集与数据库建立、模块程序调试与运行、系统测试、系统技术文件编写、系统验收）；④运行与维护阶段（系统评价、软件完善和适应性维护、硬件设备维护、系统纠错、数据更新）。

系统功能　一般分为基本功能和应用功能。基本功能包括：①数据采集、输入与编辑功能；②数据存储、更新与管理功能；③数据处理与变换功能（数据变换、数据重构、数据抽取等）；④空间分析和统计功能（拓扑叠加、缓冲区建立、数字地形分析、空间集合分析等）；⑤产品制作与显示功能；⑥二次开发和编程功能。应用功能包括：①资源管理功能；②区域规划功能；③资源监测功能；④灾害监测功能；⑤辅助决策功能。

系统发展　1963 年世界上第一个地理信息系统——加拿大地理信息系统（Canada geographic information system, CGIS）诞生。软件是地理信息系统的核心内容之一，软件技术经历了集成式 GIS、模块式 GIS、核心式 GIS、组件式 GIS、万维网 GIS 等 5 个阶段。

dimao

地貌 (geomorphy) 地球外貌各种形态的总称。它是地球内外动力对地壳作用的产物。内动力作用使地壳产生隆起和沉降，形成地球表面的基本面貌；外动力起剥蚀和堆积的作用，缩小地表的起伏和高差。内外动力的相互作用，彼此的消长，也就是地球表面形态发展和演化的过程。海洋与大陆是地球上两个基本的地貌单元。海底地貌由大陆边缘、洋盆及洋中脊组成。大陆边缘包括大陆架、大陆坡、大陆基、岛弧、海沟等地貌单元。陆地地貌按地势和形态，可分为山地、丘陵、高原、平原、盆地等类型，按动力作用性质可分为流水地貌、重力地貌、冰川地貌、风成地貌、岩溶地貌、黄土地貌、海成地貌及构造地貌等类型。地貌学是研究地表形态特征及其发生、发展和分布规律的学科，已广泛应用于水电工程的勘测与设计、矿产和地下资源普查，以及农田、军事和地图编制等生产实践中。

流水地貌　地表流水的侵蚀、搬运及堆积作用形成的各种地貌。可分为暂时性流水地貌和经常性流水地貌，前者如冲沟、洪积扇、坡积裙等，后者如河谷、河漫滩、阶地、三角洲等。

重力地貌　岸坡在重力及水的作用下形成的滑坡、倒石堆、蠕变体等地貌形态。

冰川地貌　由冰川侵蚀作用及堆积作用形成的各种地貌，如羊背石、冰斗、冰川槽谷、悬谷、侧碛堤、终碛堤等。

风成地貌　在干旱和半干旱地区，由风力作用形成的各种风蚀和风积地貌，如石蘑菇、风蚀穴或风蚀壁龛、风蚀垄槽（雅丹）、沙丘、沙漠等。

岩溶地貌　水流对碳酸盐类等可溶性岩石以化学溶蚀作用为主形成的各种地貌，如石芽、溶沟、溶斗、落水洞、溶洞、暗河、溶蚀洼地、坡立谷、峰林等。

黄土地貌　黄土内流水侵蚀作用形成的独特地貌。主要有黄土塬、黄土梁、黄土峁、黄土喀斯特、黄土柱等。

海成地貌　潮汐、海流等动力作用形成的地貌，如海蚀穴（洞）、海蚀崖、海滩、泻湖等。

构造地貌　由构造运动起主导作用形成的地貌，如背斜山、向斜谷、单面山、断层崖、断裂谷、断陷盆地等。

参考书目

杨景春，李有利．地貌学原理（修订版）．北京：北京大学出版社，2005.

diqiu wuli kantan

地球物理勘探 (geophysical prospecting) 利用地球物理的原理，依据各种岩石间的密度、磁性、电性、弹性、放射性等物理性质的差异，选用不同的物理方法和物探仪器测量一种或多种物理参数，并根据测量的地球物理场参数的变化情况，探测和判译地下地质异常体的方法，简称物

探。地下的岩（矿）体、地质构造、岩溶洞穴等基于它们所具有的物理性质、规模及空间位置，一定条件下都有相应的物理反映，地球物理勘探采用相应的物理方法测量、探测区域的多种物理信息，对测量的物理信息进行相应的处理、分析，并结合地质资料对被探测的地质对象进行推断解释，推测探测对象的规模、空间位置、延伸趋势和性质。地球物理勘探按行业可分为石油物探、金属和非金属物探、工程物探3个领域，而工程物探又分为探测、检测和监测。物探属于快捷、轻便的无损勘探方法，在水电工程勘察（包括前期阶段勘察、地下洞室施工超前预报、建基岩体和混凝土质量检测，以及运行期有关检查、探测等）中应用广泛。水力发电工程物探的主要方法有电法勘探、地震勘探、弹性波测试、综合测井、探地雷达、层析成像、水声勘探、放射性测量等。

电法勘探　在一定条件下，通过测量地表电场或电磁场变化，推断地下探测地质目标体（层）的规模、空间位置和性质。主要方法包括直流电测深法、直流电剖面法、高密度电法、激发极化法、自然电场法、充电法、可控源音频大地电磁测深法、瞬变电磁法等。主要用于覆盖层、隐伏构造破碎带、软弱夹层、岩体风化卸荷带、滑坡体、岩溶洞穴、地下水探测，也用于土壤电阻率和接地网电阻的测试。

地震勘探　利用岩土体弹性和密度的差异，通过地震仪记录人工激发地震波或天然地震波进行分析处理，从而推断地层界面、岩土性质、地质构造的一种勘探方法。主要方法包括浅层地震折射波法、浅层地震反射波法、瑞雷波法3大类，其分支方法达10种以上。主要用于覆盖层分层、隐伏构造破碎带、滑坡体、岩溶洞穴探测和隧洞地质超前预报，也用于围岩质量分级测试。

弹性波测试　利用弹性波的运动学和动力学原理对岩土体或混凝土进行波速测试或缺陷探测的一种测试方法。主要方法包括单孔声波测试、跨孔声波测试、平洞地震波测试等。主要用于岩土体质量分级测试、建基岩体质量测试或检测、地下洞室围岩松弛圈检测、固结灌浆效果检测、混凝土质量检测等。

综合测井　采用两种或两种以上的地球物理测井技术，测量钻孔中岩土体物理特征的综合探测方法。主要方法包括电阻率、自然电位、磁化率、温度、孔径、自然伽马、伽马-伽马、孔壁全景彩色成像及动态录像观察等。主要用于地质分层、地层物理参数测试等。

探地雷达　利用电磁波的反射原理，使用探地雷达仪器向地下发射和接收具有一定频率的高频脉冲电磁波，通过识别和分析反射电磁波来探测地下地质目标体（层）的一种方法。探地雷达主要采用单频脉冲表面雷达，也使用钻孔雷达，主要用于基础开挖后岩石地基和洞室围岩的岩溶洞穴探测、隧洞（道）地质超前预报、浅埋藏条件下的管线和埋设探测，也常用于隧洞衬砌支护的厚度、配筋、脱空检测等。

层析成像　利用弹性波或电磁波的透射原理，对被测区域进行多方位断面扫描，重建波速或能量吸收图像的一种探测方法。主要方法包括地震波透视、电磁波透视及声波透视。主要用于岩溶、断层、软弱夹层、风化带、卸荷带、破碎带探测，也用于岩体质量和灌浆效果、防渗帷幕等的质量检测。

水声勘探　利用声波反射原理探测水下地形地貌、水底地层厚度和分布状态的一种勘探方法，又称水下浅层剖面勘探。主要用于浅海、湖泊、水库区以及河流的水下地形调查、淤积厚度调查、抛石调查等。

放射性测量　利用介质的天然或人工放射性特点进行勘探的一种方法。主要方法包括伽马测量、辐射取样、射气测量、同位素示踪等。主要用于地层分层、断层破碎带、采空区、地下水流速流向调查和测量，也用于对工程和生活环境、材料等的放射性检测。

dixia changfang kaiwa

地下厂房开挖　(underground powerhouse excavation)

位于地下岩体中的水电站厂房的开挖施工作业。通常由主厂房，副厂房，主变压器室，尾闸室及配套的井、洞、室（如上部的电缆井、通风洞，中部的交通运输洞，下部的尾水洞）等地下建筑物组成。地下厂房一般埋藏较深，断面跨度较大，交叉口多，开挖量集中，施工中通风排水困难，施工程序复杂。地下厂房开挖作业主要包括开挖（见图）、支护、施工期通风、施工期监测等。



水电站地下厂房开挖施工

开挖　地下厂房通常采用钻孔爆破法开挖，采用自上而下的开挖程序。主厂房开挖一般分为3部分，即上部（顶拱）、中部（发电机层以上）及下部（发电机层以下）。施工时，常先挖通通风洞、交通运输洞、尾水洞等永久通道，以改善厂房开挖时的通风及运输条件，然后进行上、中、下部分分层开挖施工。一般以6～10m为一层进行开挖、锚固施工。具体分层高度需结合设计断面、围岩稳定条件、稳定围岩措施、各种井洞的相对位置、出渣通道、施工设备能力和施工技术水平等因素选定。地下厂房高边墙与各永久通道的交叉口往往是围岩最不稳定之处，一般在地下厂房中、下层开挖前挖完，并在靠近高边墙处做好支护锁口。锁口常用钢筋混凝土衬砌，长度视围岩稳定条件确定，通常不小于6m。相邻两洞室间的岩墙或岩柱，以及高边墙的支护，除随着自上而下的开挖进展，边开挖边设置锚杆或锚喷加固外，对局部不稳定围岩也要及时加固。加固措施有深孔锚栓、预应力锚索、对穿预应力锚索、抗剪钢筋混凝土塞等。

（1）上部（顶拱）开挖。一般结合顶拱通风洞或施工支洞作为最先开挖通道。无永久通道可资利用或虽有永久通道但工期推迟或干扰较大时，也常选择有利地形设置施工专用

的支洞、斜井或竖井，使能早日进入顶拱层。开挖方法通常有先拱后墙、先墙后拱和肋墙法等多种。①先拱后墙法。先开挖导洞，然后再开挖两侧的方法。围岩稳定性较差时，采取导洞开挖后边扩挖边支护边衬砌的方法。②先墙后拱法。先分层开挖厂房两侧边墙，分层高度根据边墙与永久通道的交叉位置和围岩特性确定，边墙开挖后随即分层衬砌或锚喷支护，然后进入顶拱层开挖并及时衬砌。③肋墙法（又称肋拱法）。先挖两侧导洞，在导洞中间隔一定距离开挖一条与导洞垂直的边墙或顶拱肋条，肋条宽度与间隔距离根据围岩地质条件确定，必要时可先加固围岩，开挖后进行衬砌或锚喷支护，形成边墙或顶拱的混凝土肋，然后开挖其余顶拱并进行初砌，中间岩体在衬砌后的拱墙保护下分层开挖。

（2）中、下部开挖。采用分层开挖或全断面开挖的方法。深孔预裂梯段爆破或两侧预留保护层，中间梯段爆破开挖。一般情况下，地下厂房均设置岩壁（或岩台）梁。岩壁梁爆破对外形及围岩扰动的要求较高，施工难度大，需采用控制爆破并预留 2～4m 保护层的开挖方法开挖。岩壁梁的斜面及保护层开挖可采用水平孔及小药量光面爆破的方法，也可采用垂直孔、斜孔光面爆破。若岩壁梁有不利构造面，须先将不利构造面锚固后再行开挖，以免岩台顺构造面破坏。开挖完毕后，进行锚杆安装和混凝土浇筑。在岩壁梁施工完成后再进行以下各层的开挖。与此同时，要减少爆破震动对岩壁梁的不利影响。中、下部除岩壁梁层外，其他各层的开挖方法通常有梯段预裂爆破法、台阶法及预留中层法等。①梯段预裂爆破法。用潜孔钻或车钻自出渣通道向厂房全断面推进，分层分批深孔梯段爆破，规格线处采用预裂爆破。适用于围岩稳定性好的地下厂房中、下层开挖。②台阶法。全断面自上而下分台阶浅孔爆破，台阶大小和孔深视围岩地质条件和设备性能决定。随台阶开挖可对边墙及时加固。适用于围岩稳定性差的地下厂房中、下层开挖。③预留中层法。在顶拱层开挖的同时开挖下层底部导洞，待顶拱层衬砌或支护和底部导洞扩挖后，最后开挖留下的中层岩体衬砌边墙。这种方法需增加导洞的开挖工作量，顶部和底部都需有出渣通道，但可加快开挖进度；由于中层岩体已不受限制，比较容易开挖，因此适用于围岩稳定性较好、断面跨度较小的地下厂房中、下层开挖。④其他方法。除上述方法外，还有在厂房当中部位先打竖直导井，然后自上而下采用浅孔爆破，石渣通过竖井落入底部出渣通道运出的施工方法。

支护　地下厂房洞室的支护措施主要包括喷混凝土、锚杆、预应力锚索等。（见地下工程施工支护）

施工期通风　地下厂房系统深埋于地下，其与大气仅有进厂交通洞、尾调交通洞、厂顶通风洞和电缆井等为数不多的通道相通，加之施工中大量爆破烟尘及机械设备排出的废气，施工期通风尤为重要。

地下厂房上层开挖期间，各部分交通、永久及通风通道尚不能形成贯通通道，除进口以外没有其他通风通道，因此，其通风与一般的隧洞独头掘进通风一样，采用管道式通风。开挖至地下厂房中部后，部分通道可形成循环通道通风，一般采用厂房顶部通道抽吸、下部通道压入的通风形式解决施工期通风问题。

施工期监测　由于地下厂房断面较大、开挖高度较高，需根据围岩特性、工程规模、支护方式及设计要求布置观测仪器。常见的观测仪器有收敛剂、多点位移计、锚杆应力计、钻孔倾斜仪等。

发展概况　20 世纪 80 年代以来，由于新奥地利隧洞施工法在施工中的应用以及先进的地下开挖专用设备，如多臂钻车、侧卸式装载机等的引进，中国地下厂房开挖水平迈上了新的台阶，相继建成的白山、鲁布革、太平驿、二滩、小浪底等水电站和广州抽水蓄能电站、天荒坪抽水蓄能电站等地下厂房的开挖进度较快。已建成和即将建成的龙滩、金安桥、小湾、拉西瓦、糯扎渡及溪洛渡等水电站工程，其地下厂房的规模和开挖进度都达到了国际先进水平。

dixia gongcheng shigong anquan fanghu

地下工程施工安全防护　(safety protection for underground construction)　为保护地下工程施工人员、设备、设施安全以及保证作业人员身体健康所采取的防护措施。水电工程地下洞室施工条件复杂，自然环境较差，影响人身安全、身体健康及设备安全的因素较多，需制定标准明确、技术可行、经济实用的措施。地下工程施工安全防护主要有工程安全措施、有害气体防护措施、照明安全措施、职业健康防护措施等。

工程安全措施　影响地下工程及人员和设备安全的因素有围岩掉块、塌方、岩爆、突水等。采取的工程安全措施包括：清理洞脸，在洞脸边坡外侧设置挡渣墙或积石槽，或在洞口设置网或防护棚，以防止坠落物体对人员、设备造成损害或发生人员坠落；洞口边坡采用喷锚支护或混凝土永久支护；洞内采用锚喷、预应力锚索、钢木构架或混凝土衬砌等围岩支护措施；斜、竖井井口设置防护围栏；洞内突遇涌水时加强排水；遇岩爆时及时喷护混凝土或用水喷淋；洞内外适当地点设消防设施；施工人员按要求佩戴安全帽等。

有害气体防护措施　有害气体主要由开挖爆破和内燃机械运转所产生，在含瓦斯地段或含硫化物矿层，也会存在天然瓦斯（如沼气）或含硫有害气体等。根据 DL 5162—2001《水电水利工程施工安全防护设施技术规范》及 DL/T 5099—2011《水工建筑物地下工程开挖施工技术规范》的相关规定，施工过程中洞内氧气按体积计算不应少于 20%，有害气体和粉尘含量应小于下表中标准。

采取的主要措施有自然通风和机械通风两种。

（1）自然通风。依靠洞内外空气对流的通风，具有送风容易、供风能力大、成本低的特点。对岩层不产生有害气体的短小隧洞，可借洞口进风净化空气；隧洞断面较大，采用分部开挖时，可先贯通导洞、导井形成对流通风；长隧洞或地下厂房开挖时，可利用平行支洞、永久井洞等通道使风流随井洞循环。

（2）机械通风。有压入式、吸出式和混合式 3 种。①压入式。风机将新鲜空气通过风管压至工作面，将有害气体冲淡净化。对爆破影响较小，但污浊风流自隧洞全断面排出，影响洞内其他工种作业，散烟时间随洞长而增加。②吸出式。风机将工作面的污浊风流沿风管吸出，自隧洞全断面补给新鲜空气，排烟速度快，但风管末端距工作面相对较近，易受爆破损坏。③混合式。用一台风机压入新鲜空气，另一

空气中有害物质的最高容许含量

名称	最高容许含量		附注	
	按体积（%）	按质量（mg/m^3）		
二氧化碳（CO_2）	0.5		一氧化碳的最高容许含量与作业时间	
甲烷（CH_4）	1		作业时间	最高容许含量（mg/m^3）
一氧化碳（CO）	0.00240	30	1h以内	50
氮氧化合物换算成二氧化氮（NO_2）	0.00025	5	0.5h以内	100
二氧化硫（SO_2）	0.00050	15	15～20min	200
硫化氢（H_2S）	0.00066	10	反复作业的间隔时间应在2h以上	
醛类（丙烯醛）		0.3		
含有10%以上游离SiO_2的粉尘		2	含有80%以上游离SiO_2的生产粉尘不宜超过$1mg/m^3$	
含有10%以下游离SiO_2的水泥粉尘		6		
含有10%以下游离SiO_2的其他粉尘		10		

台风机将工作面污浊风流沿风管吸出，通风能力强、卫生条件好，但需要两套以上设备，运转费用较高。

照明安全措施 地下工程施工照明电压采用36V或24V安全电压。使用投光灯照明时，可用220V电压。洞内照明采用防水灯头，淋水地段使用防水灯罩。地下工程各施工区照明度需满足有关规范要求。

职业健康防护措施 影响地下工程施工人员职业健康的因素主要有粉尘、噪声等，需采取相应的措施。

粉尘 主要来源有凿岩、爆破、出渣或二次破碎等施工作业产生的原生粉尘，以及部分已沉落而又受其他因素扰动（如风流、爆破时的空气冲击波、车辆运行、人员活动等）再次飞扬的粉尘。通常，地下工程开挖采用综合防尘措施，主要包括：采用湿式凿岩，即在钻孔时从凿岩机喷水降尘；爆破后利用喷雾器喷雾，降低悬浮在空气中的粉尘含量；地质条件容许时，利用压力水冲洗洞壁；出渣前用水淋透石渣；喷混凝土采用湿喷工艺；配置必要的防尘器材，做好个人防护。

噪声 由凿岩、出渣、通风等施工机械运行、振动、摩擦、撞击和气流扰动产生。一般地下工程施工工作面的噪声应小于90dB（A），超过90dB（A）时要采取防护或消音措施，否则要减少接触噪声的时间。

其他 包括遇到地热时设置降温设备降温，洞口附近设置急救站，洞外附近设置浴室、烘干室和理疗室等卫生措施，洞内外有可靠的通信设施等。

dixia gongcheng shigong zhihu

地下工程施工支护 （support for underground construction） 地下工程施工中维护围岩稳定，保证施工期安全的措施。地下工程施工支护可以在围岩出现有害的松弛变形之前迅速提供一定的抗力，改善围岩受力条件，控制开挖后的围岩变形增长，支承落石，保护施工期安全。施工支护的结构，通常要求有足够的强度和稳定性，能适时控制变形和承载变形后所产生的载荷，与围岩接触良好，并允许在支护后围岩能产生有限变形，以利用其自身的承载能力，结构简单，造价低廉，施工方便，所占空间较小。

地下工程施工的支护类型，根据地质条件、洞室结构、断面尺寸、开挖方法、围岩暴露时间等因素确定，一般采用锚喷支护和构架支撑。在地质不良地段施工时，除上述两种支护形式外，还采用超前支护。

锚喷支护 单独或结合使用锚杆、预应力锚索、喷混凝土、加金属网支护围岩的措施。水电工程常用的支护方式有锚杆支护、喷混凝土支护、锚杆喷混凝土与金属网联合支护及预应力锚索深孔锚固支护等。①锚杆支护。锚杆支护施工快捷，可及时提供抗力。系统锚杆一般布置成正方形或梅花形，间排距约为锚杆入岩深度的一半且不大于2m。局部锚杆深度要超过围岩松弛区。②喷混凝土支护。能对不稳定围岩提供支护抗力，封闭围岩表面和充填裂隙，阻隔涌水。③锚杆喷混凝土与金属网联合支护。锚杆深入稳定岩层，围岩松弛范围较大或高边墙不稳定的洞室常采用长短锚杆相结合表面喷混凝土支护。④预应力锚索深孔锚固支护。索体穿过围岩滑动面或不稳定区进行预张拉，并维持所需载荷对岩体施加压力，适用于大跨度洞室顶拱、高边墙、岩柱、岩墙、洞脸及高边坡等不稳定岩体。（见锚喷）

构架支撑 一般分为木支撑、钢支撑、格栅支架支撑3类。①木支撑。适用于中、小型断面和进行分部开挖的地下工程，其优点是质量小，加工、安装方便，出现险情前有征候预示且易抢工，但木材强度较低。②钢支撑。由立柱、顶梁、垫板、拉杆、连接件及楔块组成，适用于围岩稳定性差的各类断面地下工程。钢支撑承载能力大、坚固耐久、体积小、支护速度快，但成本较高。③格栅支架支撑。由钢筋组合焊接成的骨架支撑，适用于跨度较大和围岩变形量大的软弱岩层或断层破碎带，构件轻，造价较低。

构架支撑柱基均安置在平整岩面或加设的垫梁、垫板上，每排支撑构件保持在同一平面且与洞轴垂直，各排间相互连接成整体，支撑与围岩之间用背板、楔等背材塞紧，并在施工过程中经常检查支撑变形情况。

超前支护 在隧洞顶部超前于开挖工作面进行的加固措施，多用在不良地质洞段，常用的支护方式有超前锚杆支护、小导管超前支护、管棚支护等。

超前锚杆一般采用普通砂浆锚杆或自进式注浆锚杆。小导管采用直径为32～50mm的钢管。超前锚固长度一般大于循环进尺的2倍，间距一般为0.3～0.5m，倾角向上8°～10°。管棚支护又称超前钢管法，一般用在松散、较宽的断层、软弱破碎带的洞室开挖中。通过在洞室周边打设厚壁钢管形成棚架，以支立好的构架支撑及前方未开挖围岩作为支点，以管棚作为纵向梁承受顶拱荷载。管棚材料为无缝钢管，管径一

般为 42～148mm，间距为 30～40cm。钢管长度根据需要确定，在某些工程中，钢管的最大长度达到 15～20m，通过专用设备打设；有的工程还在管棚内注浆，将岩体胶结成整体，起到辅助加固的作用。

dixia gongcheng weiyan

地下工程围岩 (surrounding rock of underground engineering) 地下开挖工程周围一定范围内对其稳定和变形可能产生影响的岩体。岩体在开挖地下洞室以前处于天然地应力的平衡状态，是稳定的。开挖地下洞室以后，天然应力状态受到扰动，应力重新分布，而在洞室周围一定范围内形成局部应力集中带。由于地下工程所处岩体的地质环境，岩石力学性质和应力集中程度不同，可能在临空面处形成新的平衡而趋于稳定，也可能超过极限状态而趋于失稳。实际工程中，常采用工程类比的围岩分类法，或基于各种假定的解析或数值分析方法判别围岩的稳定程度，从而确定衬砌和支护的类型及其布置。

围岩的工程分类　根据围岩的地质条件、结构面状况和岩石（体）力学性质指标对岩体进行分类。早期的围岩分类多以单一的岩石强度作为分类指标。1970 年后，以岩体为对象的分类方法获得了迅速发展，如 N. 巴顿（N. Barton）等人的 NGI 分类等。这些分类法多数是根据经验的定性分类，由于反映了围岩的地质构造特征、围岩的结构面状态、风化状况、地下水情况以及洞室埋深等，在评价坑道或洞体稳定性、确定支护结构参数和选择施工方法等方面得到了广泛应用。中国已经建立了地下工程围岩分类的国家标准，水利水电、交通铁路、石油化工行业也根据其自身需要，建立了相应的行业分类标准。

围岩应力状态　地下工程开挖后，天然地应力状态受到扰动，围岩应力重新分布，并发生应力集中现象。洞室孔口部位的法向应力下降，在洞室边界上为零。有的部位环向压应力增加，而有的部位则下降甚至还会出现拉应力。它们在洞室边界上变化最大，向岩体深部逐渐转化为天然应力状态。

围岩应力集中程度主要取决于岩体开挖前的天然地应力状态、地下洞室的几何形状及围岩的力学性状。

(1) 天然地应力状态。岩体天然地应力状态十分复杂，地应力场是重力场和构造应力场的耦合。地应力不仅与深度有关，而且受地质环境和地形条件的影响，还不能通过理论分析进行计算，只能通过试验测定。在地下工程设计中，取洞轴线与最大主应力方向一致或小角度相交，围岩的应力集中就较缓和，因此根据地应力的最大主应力方向选择洞室走向十分重要。

(2) 地下洞室的几何形状。对于带有尖锐轮廓的洞室，局部应力集中十分严重，应该予以避免。当地下洞室的方向确定后，应根据与洞轴线垂直平面上的地应力分量选择合理的断面形状。

(3) 围岩的力学性状。地下工程所处岩体的地质背景、岩石力学性质和应力集中程度不同，围岩可能出现不同的力学性状。在均匀岩体中，围岩可能处于弹性状态，也可能进入塑性状态、黏弹塑性状态，甚至产生脆性破坏。发生脆性破坏时，轻微的表现为岩石剥离，严重的出现喷射现象（岩爆）。在层状岩体及松散破碎岩体中，围岩可能失去平衡而沿岩体软弱结构面滑动或脱落，甚至发生塌方事故。

围岩加固设计　在地下洞室开挖及运行过程中，要防止围岩失稳，保持其长期稳定性，有时需要对围岩进行加固处理。加固方式有混凝土衬砌、钢板衬砌、锚喷及各种支护、灌浆等。早期的地下工程重视衬砌和支护建设，将岩体仅仅作为衬砌和支护承受的载荷源，并假定岩体为松散介质建立了山岩压力理论。现代地下工程设计理论认为围岩既是载荷源，又是一种承载结构，应充分发挥岩石本身的强度，只在岩体本身不能维持稳定时，才进行加固处理。衬砌和支护的设计中也考虑与岩体的联合作用。围岩应力与稳定分析主要依靠有限元、边界元、离散元及块体理论等数值分析方法，在特殊条件下也可以用解析法求解。

水工隧洞要承受内水压力作用，同时有平整度要求，多数情况下要采用混凝土衬砌，有的甚至要进行钢板衬砌。这时围岩的应力状态是开挖后的应力重分布与承受内水压力后的组合状态，围岩的变形性能决定了它分担内水压力的比例。设计中要考虑围岩与衬砌的共同作用。对于圆形隧洞，基于弹性理论中的厚壁圆筒公式，根据岩体与衬砌的变形连续条件，建立了围岩和衬砌的应力计算理论。对于任意形状的压力隧洞，基于弹性地基梁的地基反力系数假定，用结构力学或其他数值分析方法计算衬砌的内力。

dixiashi changfang

地下式厂房 (underground power house) 位于地表以下岩体中的水电站厂房。其特点主要有：①厂房位置不受河谷宽窄限制，与水电枢纽的其他建筑物布置干扰小；②可以充分利用岩体的承载能力，简化厂房外围结构；③地下厂房可以全年施工，受洪水和恶劣气候的影响小；④地面开挖量小，受崩塌、滑坡等影响小，有利于环境保护；⑤地下厂房抗震性能好；⑥地下洞室通常比较潮湿，没有自然采光通风条件，噪声影响较大，需采取措施以改善地下厂房的运行环境。

分类　按埋置方式分全地下式厂房、半地下式厂房和窑洞式厂房 3 类。

(1) 全地下式厂房（见图 1）。主厂房位于距离地表一定深度的地下洞室中，发电引出线、对外交通、通风等依靠隧洞、竖井或斜井与外部联系，主变压器一般布置在地下，开关站也可设于地下，是地下式厂房中最常见的类型。

(2) 半地下式厂房（见图 2）。主厂房或主厂房的下部结构布置于山体明挖的深槽（井）内，相应的上部结构为掩埋式或敞露式，适用于埋置较浅的地下式厂房。

(3) 窑洞式厂房（见图 3）。主厂房置于岸边山体窑洞内。在河谷狭窄、厂房布置困难、岸边地质条件较好的情况下，可采用此种厂房。中国刘家峡水电站厂房的 2 台机组布置在窑洞内。

地下式厂房的布置　主厂房安装有水轮发电机组及附属设备。水轮机前多设有事故和检修用阀门，有的设在主厂房内，有的设在主厂房外单独的阀室内。一机一管引水且引水及压力管道较短的水电站，可采用装置在进水口、压力前池或调压室中的快速闸门代替水轮机前的阀门。尾水管出口连

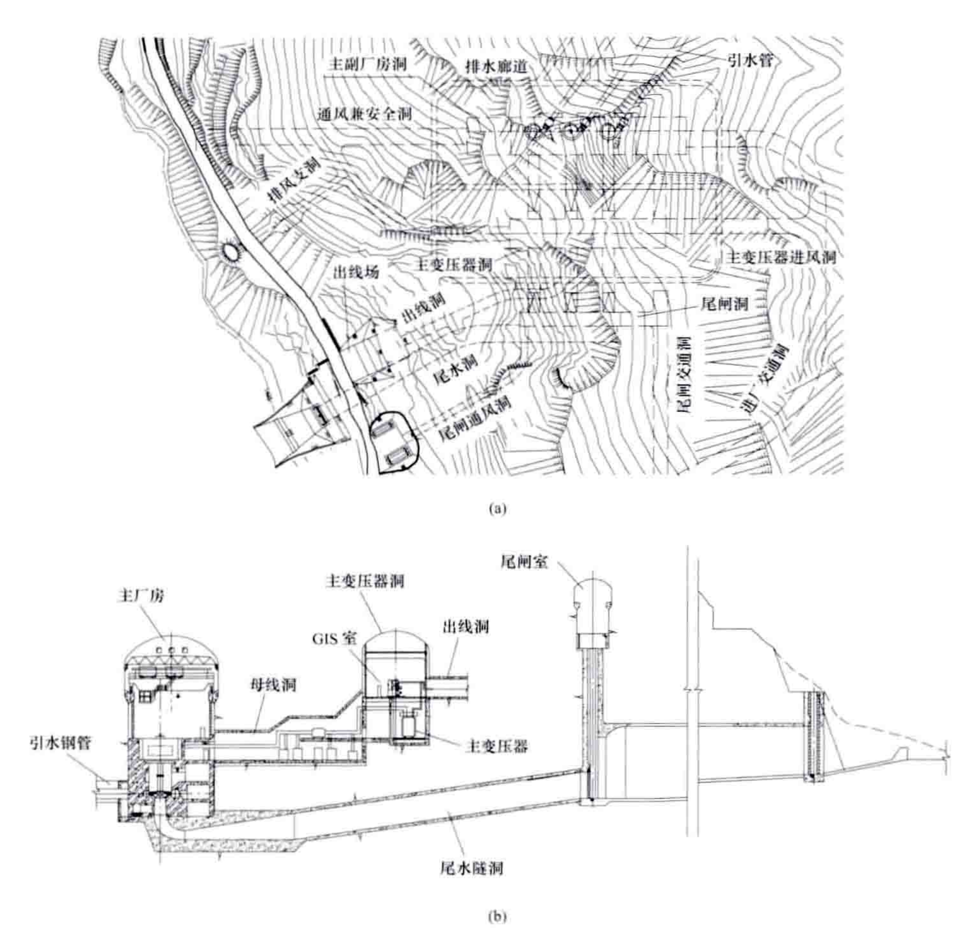


图 1　全地下式厂房示意图

(a) 厂区平面；(b) 地下厂房横剖面

在邻近主厂房的地下洞室内，称为主变压器洞。大型水电站主变压器洞一般位于主厂房的下游侧，平行于主厂房洞。其优点是布置紧凑，每台机组的母线都较短，电能损失小，出线方便，主变压器与主厂房截然分开，有利于防火防爆。也有将主变压器布置在主厂房洞内的一端或两端的，这种布置方式多用于机组较少的水电站。地下主变压器检修可利用安装间进行，高压侧出线采用高压电缆引出，需要的出线洞断面尺寸不大。

大型地下厂房一般采用 GIS 户内开关装置，可布置在地面开关站的 GIS 室内；若厂区地形陡峭、高差大，也可把开关站布置于地下，一般布置在主变压器洞室中，洞室分上、下两层，上层为开关站，下层为主变压器室。

运行条件　地下厂房各部位对环境的温度、湿度有一定要求，一般都设有防潮和通风设施。对洞室围岩地下水较丰富、岩体透水性强的工程，常需采取帷幕灌浆及排水措施，以减少地下水渗漏，并按有关标准设计和配备排水、防潮、防火、防爆、防噪声、防振、通风、照明、上下水、卫生设施等，以及安全通道。

接尾水隧洞。

副厂房多设在地下主厂房端头，分多层布置。埋深不大的地下式厂房，也有把副厂房的全部或部分布置于洞外地面的。

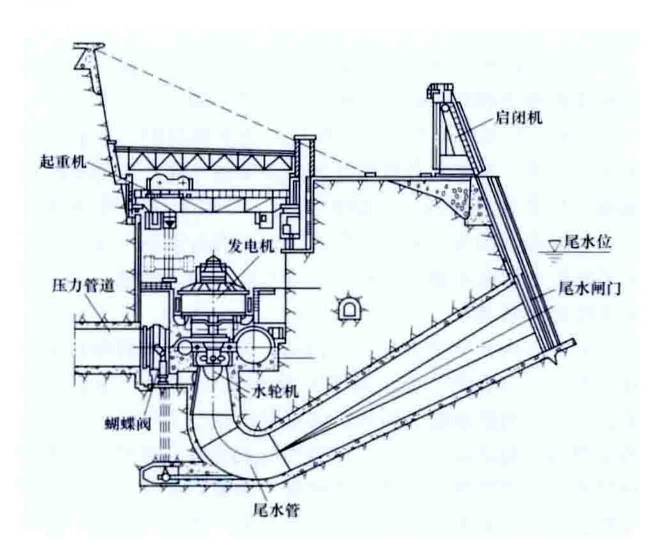


图 2　半地下式厂房横剖面

主变压器与开关站可布置于地面，也可布置于地下洞室内，有多种组合。埋深较大的地下式厂房多把主变压器安装

洞室稳定　地下式厂房洞室由主洞室和附属洞室组成。洞室埋深与方位主要由水电枢纽布置要求和地形、地质条件决定。一般要求主洞室的纵轴线方向尽量与岩体的主要构造面（断层、破碎带、节理、裂隙、层面）呈较大的夹角；对于高地应力区，要兼顾地应力方向，尽量使主洞室的纵轴线与最大地应力方向交角较小，以利围岩稳定。洞室之间岩墙（柱）要保留一定厚度，以维持围岩稳定。洞室断面形状和高跨比对围岩稳定性也有一定的影响。岩体完整、坚硬，地应力不大时，一般采用直墙拱形断面；岩体破碎、强度低，水平向地应力较大时，可采用马蹄形或卵形断面。开挖过程中要根据工程地质情况及时采取支护措施，防止崩塌。为了保证地下式厂房在长期使用中的安全，需对洞室进行永久性加固支护，可采用喷锚支护或钢筋混凝土衬砌。早期兴建的地下式厂房永久性加固支护多采用钢筋混凝土衬砌，20 世纪 60 年代以后，随着地下工程技术的进步，地下式厂房洞室广泛采用锚

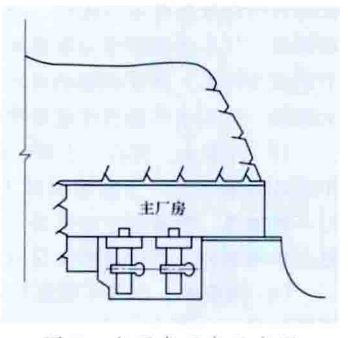


图 3　窖洞式厂房示意图

喷支护作为一种永久支护结构形式。实践证明，地下式厂房洞室采用预应力锚索、锚杆和喷混凝土联合支护作为永久支护，可大大加快施工进度，节约投资。

简史　1897年，瑞士建造了世界上第一座地下式厂房——费纳雅茨（Vernayaz）水电站厂房。至1956年，世界上投入运营的水电站地下式厂房约100座，装机容量约10000MW。此后，新的地下洞室开挖、支护技术和大型施工机械的出现，促进了地下厂房的迅速发展。世界上已有400余座水电站地下式厂房投入运行，总装机容量超过50000MW。国外最大的一座地下式厂房为加拿大的拉格朗德二级（La GrandeⅡ）水电站厂房，于1977年投产，装机容量5330MW，共安装16台机组，地下厂房尺寸为483m×26m×47.3m（长×宽×高）。

中国于20世纪50年代共建成4座水电站地下式厂房，总装机容量132MW。80年代，其规模和建设速度都有新的发展，吉林白山水电站地下式厂房跨度为25m。90年代以来，随着设计、制造和施工技术水平的提高，地下式厂房的规模越来越大。2000年建成的四川二滩水电站，装机容量3300MW，安装6台机组，地下式厂房尺寸为280.29m×25.5m×65.35m（长×宽×高）；在建的金沙江溪洛渡水电站装机容量13860MW，安装18台机组，左、右岸两个地下式厂房的尺寸分别为439.74m×28.4m×77.6m（长×宽×高）和443.34m×28.4m×77.6m（长×宽×高）；金沙江白鹤滩水电站装机容量16000MW，安装16台机组，左、右岸两个地下式厂房尺寸均为453m×31m×88.7m（长×宽×高）。

dixiashui

地下水　（groundwater）　储藏在地壳岩土中的各种形式的水。地下水是工农业和生活用水的重要供水来源之一，也与各种工程建设，如兴建水库、矿山和大型建筑物等关系密切。地下水可按存在形式、储藏条件以及含水孔隙形状进行分类。

按存在形式分类　可分为气态水、吸着水、薄膜水、重力水、毛细水、固态水等。

（1）气态水。即水蒸气，和空气一起充填在岩土体的空隙中，从压力大的地方向压力小的地方流动，亦即由温度高的地方向温度低的地方流动。当岩土体中空气冷却到零点或更低时，气态水能凝结为液态水或固态水，而在相反的情况下则变为蒸发。蒸发和凝结对岩土体中的水分重新分布有很大影响，气态水不能直接被植物吸收。

（2）吸着水。受岩、土颗粒的分子引力和静电引力作用牢固地吸附在岩、土颗粒表面上的水，只有在105～110℃时不断加热，吸着水才能从岩土中排出。其主要特点是不受重力作用影响，不传递静水压力，不能直接被植物吸收。

（3）薄膜水。水气不断凝结，岩、土颗粒吸附的水分子逐渐加多，包围在吸着水外面而使水膜加厚的这部分水分子。薄膜水也受岩、土颗粒的分子引力和静电引力作用保持在岩、土颗粒上。它不受重力作用影响，不传递静水压力，但能从水膜厚的地方向薄的地方移动，能被植物根系吸收。

（4）重力水。又称自由水。当薄膜水的厚度再增大时，岩、土颗粒对外层水的作用力逐渐减小，最后这种力量不能平衡水的自重，薄膜水变为液态水滴，受重力影响而在岩土体空隙中运动。重力水能传递静水压力，是水文地质研究的主要对象。

（5）毛细水。由毛细力作用而保持在岩土体毛细孔隙或毛细裂隙中的水。通常毛细水分布在潜水面之上，并与潜水直接连通。毛细水能传递静水压力，能被植物根系吸收。地下水面离地表较浅时，毛细水有时会引起土壤沼泽化或盐碱化，以及路基和地基冻胀、路面翻浆等。毛细水的研究在农业和工程建筑方面有着重要意义。

（6）固态水。以冰的形式存在于岩土体中的水，常见于多年冻结区的岩土层中。在多年冻结区外，寒冷季节也有季节冻结的固态水。弄清多年冻结层的厚度，对开采矿产和为了供水而取用地下水，都有很大意义。

按储藏条件分类　可分为包气带水、潜水、承压水。

（1）包气带水。位于潜水位以上岩土体中的暂时性水，一般分为两种：一种是岩土体中的吸着水、薄膜水和毛细水，另一种是局部隔水层上的上层滞水。包气带水在农业上具有比较重要的意义。

（2）潜水。地表以下第一个隔水层以上具有自由水面的地下水。潜水接受大气降水补给，潜水位易受降水影响而呈季节性变化。潜水面可以自由升降，潜水一般埋藏浅、分布广、开采方便，是重要的供水水源，但易受污染。

（3）承压水。充满于上、下两个隔水层之间的具有承压性质的地下水。当钻孔钻穿上部隔水层时，孔中水位会上升超过含水层的顶板达到稳定，从稳定水位到含水层顶板的铅垂距离称承压水头。承压水头超过地面就能喷出地面形成自流水或上升泉。承压水由于上部有隔水层，不直接受降水和蒸发的影响；又由于距补给区远，其水质、水量和水位的变化小，承压水是良好的供水水源。

按含水孔隙形状分类　可分为孔隙水、裂隙水、岩溶水。

（1）孔隙水。分布于岩土体孔隙中的地下水。它主要分布于松散沉积层中。第四纪的冲积、洪积与冰水沉积的砂层和砂砾石层中地下水的水量大，水质也较好，可作为供水水源。

（2）裂隙水。分布于岩体裂隙中的地下水。它主要分布于断层破碎带和地表风化裂隙中，水量一般比孔隙水少。

（3）岩溶水。分布于可溶性岩层的溶蚀裂隙与溶洞中的地下水。由于岩溶发育程度及气候条件的不同，岩溶水的储藏条件是多种多样的。一般溶洞大、裂隙宽时岩体透水性强，但分布不均匀。如大气降水充沛，则岩溶水丰富。岩溶水是良好的供水水源。但对于矿坑与地下建筑物施工会产生灾害性的突然涌水。

地下水的性质及其评价　包括：①地下水的物理性质与化学性质。水质受气候、地质环境和人为条件（采矿、施肥、排污）的影响随时间和空间有所变化。水质是评价水资源质量和水对混凝土建筑物侵蚀性的最基本的资料。水的物理性质主要包括颜色、味、透明度、温度、重度、导电性及放射性等；一般无污染的天然水是无色、无味、无嗅、透明的。水的化学性质包括离子成分、矿化度、氢离子浓度、硬度及游离气体等。②离子成分。地下水含量最多的离子为钠、钾、钙、镁、重碳酸根及氯等。③矿化度，又称总矿化度。指水中所含各种离子、分子、化合物的总量。通常以

105～110℃烘干时所得的干涸残余物重量来表示。地下水按矿化度大小可分为淡水、微咸水、咸水、盐水及卤水。④氢离子浓度，即pH值。是衡量水的酸碱性的指标。⑤硬度。可分为暂时硬度、永久硬度和总硬度。暂时硬度是指水煮沸时分解析出的钙、镁离子含量；煮沸后水中残余的钙、镁离子含量称为永久硬度；暂时硬度与永久硬度之和称总硬度。根据硬度将水分为极软水、软水、微硬水、硬水及极硬水5级。⑥游离气体。主要有二氧化碳、氧、氮等。⑦水质评价。随不同的利用目的（如混凝土、钢结构、生活饮用、灌溉、工业用水等），各有其水质标准。在水电工程建设中，主要评价水质对混凝土、钢结构及防渗体等的腐蚀性。

dixing celiang

地形测量　(topographic survey)　在控制测量的基础上，根据规范和图式，应用测绘仪器和工具将指定区域或范围内的地表地貌、地物及其他地理要素的位置与高程测量并记录在某种载体上的技术。主要包括图根控制测量、地形测图、编辑整饰等流程，地形测量的成果为不同比例尺的地形图。

地形测图中，地物以测定的地物轮廓或中心位置，用符号、注记或真形的几何形状表示，地形测定地面坡度变换点、集水与分水线等，用等高线配合地貌符号及高程注记点等表示其特征。限于图面负载，实际地貌与地物必须根据图面及比例尺综合取舍，等高线间距宜适当选定，以充分显示特征。地形图的要素有地貌、水系、道路、管线、境界、植被、居民地及测量控制点等。测图方法分为野外实地测图和摄影测图。野外实地测图传统的方法是利用平板仪测图法、经纬仪测图法等测图，又称白纸测图，随着计算机及各种先进的数据采集和输出设备的发展应用，已被数字化测图所代替；摄影测图，有地面摄影、航空摄影、航天摄影之分。水电工程地形测量中常用的是数字化测图、地面摄影测量、航空摄影测量、航天摄影测量，另外因水工设计需要了解江河、湖、海等水下地形，常需进行水下地形测量。

数字化测图　以计算机及其数字成图软件为核心，利用外接输入输出设备将各种手段采集的地形空间数据传输到计算机进行处理，经过编辑、图形处理生成数字地形图的测量技术。数字化测图的实质是解析法测图，其基本作业过程包括数据采集、数据处理和地形图输出三个阶段。数据采集的方法包括野外数据采集、航测数据采集和数字化仪数据采集。野外数据采集是大比例尺地形图的主要数据采集方法，其作业手段包括全站仪极坐标法、GNSS RTK、三维激光扫描等。数据处理是数字化测图系统的核心，是将实地采集得到的地物、地貌特征点坐标和高程数据，经计算机处理自动形成不规则三角网（TIN），建立数字地面模型（DEM），再根据DEM用内插法自动生成等高线，通过图形编辑形成规定比例尺地形图。数字化测图系统包括数据采集设备（数字化仪、扫描仪、全站仪、GNSS、三维激光扫描仪等）、数据处理设备（计算机）、地形图输出设备（绘图仪）等硬件设备和数字化测图软件系统。

摄影测图　利用摄影和传感器获得被研究对象的影像和数字信息，经图像处理、几何信息的量测和物理信息的提取过程，求得物体大小、形状、空间位置和判断其性质等的测量技术。摄根据摄影时摄影机位置分为地面摄影测量、航空摄影测量和航天摄影测量。

地面摄影测量　用地面摄影经纬仪在选定的基线两端，按一定方式摄影，获得被摄物体的立体像对，进行测绘地形图的测绘技术。地面摄影测量按发展过程分为模拟地面摄影测量和数字地面摄影测量，按地面摄影基线数量分为地面单基线摄影测量和地面多基线摄影测量。应用较为广泛的是数字地面多基线摄影测量。

航空摄影测量　利用装有摄影仪器的航空飞行器对地面连续摄取航空影像资料所进行的摄影测量。主要通过航空摄影、航空影像经摄影处理、外业像片联测与调绘、空中三角测量加密、立体测图等步骤测定地物和地貌的形状、大小和空间位置。①航空摄影通常采用竖直摄影，特殊需要可采用倾斜摄影。当摄影无须重叠时，为单片摄影；仅航线方向有重叠为航线摄影；既要航向重叠，又要相邻航线间旁向重叠时为区域摄影。摄影前根据目的拟定航摄计划，确定选用的摄影相机、摄影比例尺、航高、航向、像片重叠度和摄影倾角、航偏角、航向弯曲、航迹线偏离中心线等技术要求。②航测外业包括像片控制点（简称像控点）的联测（简称像片联测）和像片调绘。像片联测是根据像片控制点的布设要求，在实地选测像片上的明显地面点或航摄前所设的地面标志点，测定其坐标或高程，像控点分平高点、平面点和高程点3种类型；布设方法包括全野外法、航线网或区域网布点法、机载POS（IMU/DGPS）辅助航空摄影测量布点法3种。像片调绘是把像片上显示和没有显示，而成图必需的地物和地貌元素、地理名称、境界等，经像片判读、调查和补测，并用图式符号、文字注记等绘注在像片上，作为测图的依据。③空中三角测量利用像片内在几何特性进行加密控制点的方法，主要采用有航带法、独立模型法、光线束法3种。④立体测图仪测图的基本原理是投影过程的几何反转（单张像片测图的基本原理是中心投影的透视变换），实质上是把中心投影（航摄像片）转变为正射投影（地形图或正射影像图）。立体测图方法包括综合法、分工（微分）法、全能法3种，现主要使用全能法测图。航测全能法测图按发展历程分为模拟测图、解析测图、全数字测图3个阶段，摄影测量主要采用全数字测图方法。全数字测图方法是基于摄影测量原理对数字影像或数字化影像应用计算机技术、数字影像处理、影像匹配、模式识别等多学科的理论与方法，提取所摄对像以数字方式表达的几何与物理信息，建立数字地面模型（DTM）和数字高程模型（DEM），获取数字线划地形图（DLG）、数字栅格地形图（DRG）和数字正射影像图（DOM）等数字测绘产品。

航天摄影测量　以航天运载工具卫星、宇宙飞船和航天飞机作平台，利用摄影机、多谱段扫描仪和雷达等获取地球及其他星球的图像，又称航天遥感。由于获取了地面从紫外到远红外之间各个谱段的图像信息（胶片记录）和数字信息（磁带记录），地面分辨率从几十米到几分米，覆盖地面的周期短。已广泛应用于资源调查、气象、环境信息及1∶10 000比例尺地形图的修测等。

水下地形测量　测绘江、河、湖、海、塘的水下地面形状的工作，是水电工程测量中不可缺少的部分。水下地形测量主要包括水深测量与水下定位测量两个方面内容。水深测量方法包括传统的测深杆、测深铅锤和现代的回声测深仪、

多波束测深系统、条带式测深系统、侧扫声纳系统、激光测深系统等；水深测量位置定位方法主要包括天文定位、光学定位（测角交会定位法、全站仪定位法）、陆基无线电定位、空基无线电定位（如全球导航卫星GNSS定位法）和水深定位法等。水下地形测量成图先对外业采集到的数据进行预处理（如数据检查、数据改正、水深数据选取、水下地形点数据生成等），建立水下数字地形高程模型（DEM），再生成能反映水下地形地貌的地形图。

地形图按比例尺可分为大比例尺地形图（1∶500～1∶2000）、中比例尺地形图（1∶5000～1∶10000）、中小比例尺地形图（1∶25000～1∶100000）和小比例尺地形图（小于1∶100000）。大比例尺地形图采用高斯投影3°分带（可采用任意中央子午线），中比例尺地形图采用高斯投影3°分带，中小比例尺、小比例尺地形图采用高斯投影6°分带。水电工程测量应根据不同的设计阶段和建筑物对地形图精度和内容的要求不同而选择不同的测图比例尺；若设计需用较大比例尺图可采用实测放大图；凡按国家基本比例尺成图的1∶5000和1∶10000的地形图还应满足国家、行业测绘规范中的相应规定。

参考书目

冯仲科．测量学原理．北京：中国林业出版社，2002．

diyingli

地应力 (in-situ rock stress)

存在于地壳中的未受工程扰动的天然应力。也称岩体初始应力、绝对应力或原岩应力，广义上也指地球体内的应力。包括由地壳运动、地质构造、重力及其他因素产生的应力。

diyingli ceshi

地应力测试 (geostress measurement)

测定天然状态下岩体内部地应力的技术。地应力是指岩体在天然状态下所具有的内应力，主要是在地壳构造运动和重力综合作用下形成的应力。测试方法主要有孔壁应变法、孔底应变法、孔径应变法、水压致裂法、表面应变法、声发射法等6种。

孔壁应变法　在钻孔孔壁粘贴电阻应变片，测量套钻解除后钻孔孔壁应变，推求岩体内的三维应力状态，适用于完整、较完整岩体。按其应变计结构和适用环境分为浅孔孔壁应变法、浅孔空心包体孔壁应变法和深孔水下孔壁应变法。①浅孔孔壁应变法。直接在孔壁上粘贴应变片，适用于地下水位以上岩体，孔深不宜超过30m，钻孔宜向上倾斜3°～5°。②空心包体孔壁应变法。将应变片粘贴在一预制的薄环氧树脂圆筒上，再包裹一层环氧树脂。③深孔水下孔壁应变法。采用特殊的水下黏结剂及粘贴工艺，在水下孔壁上粘贴电阻片，适用于地下水位以下完整、较完整的岩体，测试深度大于30m。

孔底应变法　在钻孔孔底平面粘贴电阻应变片，测量套钻解除后钻孔孔底岩面应变变化，推求孔底周围的岩体应力状态，适用于各向同性岩体的应力测试。

孔径应变法　在钻孔内埋设孔径变形计，量测套钻解除后钻孔孔径的变形，经换算成孔径应变，分析求出岩体内该点的平面应力参数。当需测试岩体的空间应力状态时，应采用三孔交汇测试方法，一般采用两侧测孔与中间测孔分别构成45°夹角。

水压致裂法　在钻孔内用可膨胀的橡胶封隔器阻塞钻孔，形成一封闭的加压段，泵入水对该孔段加压，同时记录水压随时间的变化。当增压到孔壁岩体破裂时，压力随之下降，经稳压一段时间后停止加压，维持裂缝张开，最后将压力泵卸压至零。绘制压力与时间关系曲线。根据水压力和破裂面的方位，确定试验段岩体初始应力的大小和方向。

表面应变法　通过量测岩体表面的应变，计算岩体或地下洞室围岩受扰动应力重分布后的岩体表面应力状态。又分表面应力解除法和表面应力恢复法。①表面应力解除法，把电阻片粘贴在岩石表面，掏槽解除岩体应力，测量应力解除前后岩壁表面发生的应变变化，计算岩体应力。②表面应力恢复法，在岩体表面掏槽，测量掏槽引起槽的上、下岩体发生的相对位移，通过压力枕油压增加逐步使相对位移减少至零，则以此时的油压地表岩体表面应力为该方向的初始应力。

声发射法　以测定到的岩石声发射（AE）现象明显增加时的起始点压力，作为岩体的地应力。一般认为，声发射法测试的地应力值偏高。

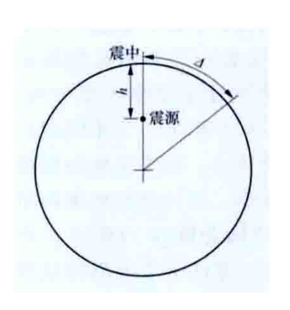
dizhen

地震 (earthquake)

一种突发的地表震动现象。按其成因可分为构造地震、火山地震和陷落地震。构造地震因地下岩体突然破裂引起，其破坏性大、影响面广，大多数地震属于此类。

全世界每年发生数百万次地震，其中能造成严重破坏的平均约为18次，主要集中在太平洋沿岸地震带和阿尔卑斯（或称地中海）地震带上。中国处于这两大地震带中间，是一个多地震国家，有数千年的地震记述历史。

一定时间序列内相继发生在相近地区的、在成因上有联系的一系列大小地震称为地震序列，其中最强烈的一次称为主震，主震前后的地震分别称为前震和余震。少数地震主震不突出，或者前震和余震非常小。地球内部构造破坏发生地震的地方称为震源。震源（中心点）在地面上的投影称为震中，其到地面的垂直距离称为震源深度。震中位置以经度、纬度来标志。从震中到观测点沿地球表面大圆弧测量的距离称为震中距（见图），可用弧线距离或对应的地心角表示。1°＝111.1km，震中距小于100km的称地方震，大于1000km的称远震，介乎其间的统称近震。



震源和震中示意图

h—震源深度；Δ—震中距

地震时由震源向各个方向传播的弹性波称为地震波，包括体波和面波。体波在地球内部传播，分为纵波和横波。纵波又称P波或压缩波，其介质质点的振动方向与波的传播方向一致。横波又称S波或剪切波，其介质质点的振动方向与波的传播方向垂直。体波到达地表层，沿地球表层传播的称面波。

纵波传播速度最大，横波波速一般约为纵波的60%，面波波速稍低于横波。一般地震波波速随地层深度而增大。地震时的地面运动是这些波在地层界面不断折射、反射后累

加形成的不规则复杂空间运动。

地震震级（M）是地震时所释放出能量大小的等级划分。通常取为在规定的震中距和标准地震仪上取得的地震波图上最大幅值的对数值。根据近震体波或远震面波测定的震级分别以 M_L 和 M_S 表示。中国地震部门规定用地震面波质点运动最大值测定。M_S 和 M_L 间的换算公式为 $M_S=1.13M_L-1.08$。通常 $M<2$ 称为微震，$M=(2\sim4)$ 称为有感地震，$M>5$ 称为破坏性地震，$M>7$ 称为强烈地震。用统计法求得的震级（M）和地震波释放的能量（E）间的经验公式为 $\log E$（尔格）$=11.8+1.5M$。震级差 1 级，能量约差 30 倍。

dizhen anquanxing pingjia

地震安全性评价 (seismic safety evaluation) 根据工程所需要的防震抗震设计风险水平，提出一定概率水准下的地震动参数，并对场址地震地质灾害作出评价与预测。包括区域地震地质构造环境评价、断裂活动性鉴定、地震活动性与地震危险性分析、地震地质灾害评价等。地震危险性分析方法分为确定性方法和概率分析方法。确定性方法又有地震构造法和最大历史地震法。地震安全性评价范围包括对工程场址有影响的范围，一般不应小于工程场址外围 150km，分为远场区（不小于 150km 范围）、近场区（不小于 25km 范围）、场址区（5km 范围）3 个层次开展工作。

在地震安全性评价中，重要的是了解工程场地所在区域范围内的地震活动规律，预测在工程使用年限内工程场地周围可能发生地震的地点、强度以及可能对工程场地的影响。地震安全性评价的主要依据之一是对地震活动性的认识，而对地震活动性规律的认识需要建立在完整可靠的地震资料的基础上。中国的地震记载最早始于公元前 1831 年，记载内容较丰富，但历史地震的记载在地域上偏重于东部，西部记载很少。在地震安全性评价中，利用历史地震资料进行地震活动性研究时，首先要对资料的完整性和可靠性进行分析。鉴于地震科学研究的水平，对地震活动性研究的方法还处于描述推理和统计规律的认识阶段。由于地震活动和地质构造运动有着密切的关系，将历史地震与研究区域内的地质构造及其构造运动（特别是最新构造运动）相结合，有助于地震活动性的判断。

区域地震地质构造环境评价　着重分析区域地质构造及演化、新构造运动、地球物理场和地壳结构的主要特点，以及主要断裂带的基本特征和活动性，阐述区域地震构造环境和强震发生的构造条件，找出区域内构造活动与地震活动的相互关系，为工程的地震安全性评价提供发震构造确定、潜在震源区和地震构造区划分的基本依据与基础资料。

断裂活动性鉴定　对工程场址安全至关重要。目的是为合理评价近场范围内由于主要断裂活动而可能造成的地表破裂对场址的影响。主要断裂是指区域性的、具有一定规模的大断裂（长度一般大于 15km），延伸到场址或靠近场址的断裂。

地震活动性与地震危险性分析　地震活动性重在研究地震安全性评价范围内一定时期的历史地震活动特性，包括地震的时间、空间分布特点和地震频度、地震强度的变化，同时与区域内的地质构造及其构造活动（特别是最新构造活动）相结合，综合研究地震活动的基本参数和参数之间的相互关系。地震危险性分析是在区域地震活动性与地震地质背景研究的基础上，划分地震带（地震统计区）和潜在震源区，确定地震活动性参数，结合地震动衰减关系，计算场地一定年限和一定概率水准的地震动参数。

地震地质灾害评价　主要是通过实地考察场地地形、地质条件，结合震害经验和相关规范，评价场地在给定地震影响下场地发生滑坡、崩塌、砂土液化、软土震陷、断层的地表错动影响等可能性。

dizhendong canshu

地震动参数 (ground motion parameter) 描述地震动的物理参数，主要包括峰值加速度、反应谱、持续时间等。地震动是指地震引起的地面运动。早期抗震设计是采用地震基本烈度的概念，后直接使用地震动参数。确定工程场地地震动参数的方法有两种：①对于一般工程，按 GB 18306《中国地震动参数区划图》，根据场地所处位置、场地条件，确定抗震设防水准为 50 年超越概率 10% 的地震动峰值加速度和地震动反应谱特征周期；②对于抗震设防要求较高的重大工程或地震研究程度和资料详细程度较差的边远地区，需开展专门的地震安全性评价工作。影响地震动参数的主要因素包括震源特性、地震波传播途径和场地条件等。

峰值加速度　与地震动加速度反应谱最大值相对应的水平加速度。它反映地震动的强弱，其值越高，表明地震动越强。

反应谱　表示一次地震动振幅与频率的曲线。通过理想简化的单质点体系反应来描述地震动特性。地震动反应谱特征周期，为地震动加速度反应谱开始下降点的周期，它反映地震震级、震中距和场地类别等多种因素。

持续时间　地震动的持续时间。一般情况下持时越长则对地面建筑物破坏越大。

dizhen liedu

地震烈度 (earthquake intensity) 表示地震发生时在波及范围内一定地点的地面及房屋建筑遭受地震影响和破坏的程度。震中区的烈度称为震中烈度（I_0），它与震源深度有关，对一定震级（M）来说，震源深，则震中烈度低，但影响范围大。中国大多为震源深度小于 60km 的浅源地震，其 6～7 级地震对应的震中烈度为Ⅷ～Ⅸ度。

烈度表　评定地震烈度的标准。已有的烈度表主要以人的感觉、器物反应、建筑物的破坏和地表现象等宏观现象的描述为主。国际上较普遍采用的是划分为 12 度的修正麦卡利（Mercalli）烈度表，简称 MM 烈度表。日本采用划分为 8 度的 JMA 烈度表，两种分度法的大体对应关系为 $I_{MM}=1+1.5I_{JMA}$。GB/T 17742—2008《中国地震烈度表》中采用 12 等级的地震烈度划分，评定指标包括人的感觉、房屋震害程度、其他震害现象、水平向地震动参数。在地震工程中通常采用地面最大加速度作为与烈度对应的物理量，基于实测最大加速度的统计平均值给出相应的标准。加速度常以重力加速度 g 度量，$1g=9.81\text{m/s}^2$，$1g=981\text{gal}$（伽），烈度每差 1 度，加速度约差 1 倍。根据统计资料，任意两个互相垂直的水平分量基本接近，竖向分量则大致为水平分量的 1/2～2/3。也有采用速度、位移或其他物理量作为烈度定量标准的。地震烈度随震中距增大而衰减，其衰减规律随地区而异。每次地震用烈度表示的等震线称为等烈度线，通常接

近椭圆形。

基本烈度　表示某地区今后一定期限内（50年超越概率10%）在一般场地条件下可能遭遇的最大烈度。基本烈度不包括局部场地条件引起的烈度变化，对工程场址的具体地质、地形和地基条件等因素造成的小区域烈度异常，以往曾采用场地烈度的概念调整烈度。中国已不采用这种增减烈度的方法，而是在抗震设计中从场地选择、调整地基承载力和其他地面运动参数等方面加以考虑。

设计烈度　以基本烈度为基础，根据建筑物的重要性按抗震规范作适当调整后作为抗震设计中实际采用的烈度。

在水电工程中，大中型工程多采用通过地震安全性评价确定的地震动参数进行抗震设计。只有少部分工程或某些建筑、结构等工程仍然按照地震基本烈度、设防烈度等级方法，采用烈度对应的地震动参数做抗震设计。

dizhen weixianxing fenxi

地震危险性分析　(seismic risk evaluation)　见地震安全性评价。

dizhi gouzao

地质构造　(geological structure)　地壳运动中岩土体受内、外动力作用下产生的变形和变位的形迹。地壳运动使原始产状近于水平的岩层变形、破裂、变位，形成褶皱、断层、节理等各种地质构造形迹。这些构造形迹常成组（带）产生，反映了某种方式的构造运动和构造应力场。地质构造按涉及范围大小可分为显微构造、区域构造、大地构造（或称地壳构造）。显微构造是指露头范围内、手标本或显微镜下观察到的构造形态；区域构造指一定区域范围的地质构造；大地构造指大至全球的地壳构造。专门研究地质构造的学科，叫构造地质学，也是地质学的一门分支学科。

对地质构造形态、产状的调查，对其成因和分布组合规律的研究以及对其力学机制和演变历史的分析是工程地质、水文地质勘察的基础工作之一。这项工作对论证工程地区的区域构造稳定和岩体稳定、地下水的储存条件、水库和建筑物的工程地质条件都是十分重要的。

参考书目

成都地质学院，徐开礼，中国地质大学，朱志澄．构造地质学．2版．北京：地质出版社，2002.

dizhi lixue moxing shiyan

地质力学模型试验　(geomechanical model test)　为研究工程结构与周围岩体的力学行为和工作性态，依据力学相似和几何相似准则，以模拟材料制成模型而开展的试验技术。它既可以模拟工程结构的特点，也能近似模拟岩体及其层理、节理、断层等复杂地质因素对岩体和工程结构的影响。

类型　通常按模型试验状况、模拟范围进行分类。

(1) 按模型试验状况，分为工作状态模型试验和破坏状态模型试验。前者研究岩体和结构在正常工作状态下的结构形态、应力分布和变形状态。后者通过超载或降强加荷，或超载和降强综合作用直至模型破坏，从而研究岩体和结构的开裂、扩展机理，抗滑以及结构的整体安全度。

(2) 按模拟范围，分为整体模型试验和断面模型试验。

模型制作　需满足力学相似和几何相似准则，并要求模型与原型的应变和摩擦系数尽可能一致。为满足相似准则，制作地质力学模型时要选择质量大、弹性模量小的材料，通常选用重晶石粉、铅丹、石英砂和铁粉等为骨料，以硅藻土、膨润土为掺合料。块体间摩擦可用塑料薄膜、纸或甘油模拟，断层充填物采用石膏、淀粉、软胶等材料。对喷锚支护的地下洞室模型，常以铁丝、铜丝、铝丝和竹扦等材料模拟锚杆。而通过温度变化调整材料强度的新材料，可一定程度上模拟降强的试验过程。

荷载模拟及测量技术　地质力学模型试验中需要模拟荷载作用，包括水荷载、泥沙荷载、温度荷载以及自重荷载。其中自重荷载由模型材料自重形成，其他可采用气压袋法模拟，按增大容重法加载或以橡皮囊装满液体（水或水银）施加面力，也可用小千斤顶分块施加集中力代替。地质力学模型试验也可以采用人工和机械手等方式对洞室进行开挖模拟。地质力学模型试验的量测内容主要有位移、应变量测和裂隙量测等。量测技术已向高精度、传感仪器微型化、遥测及自动化方向发展。为避免误差，在试验过程和结果处理中应依据误差分析的理论方法，对试验过程、试验测得数据进行误差分析处理。

成果分析和评价　试验时可以测量模型各测点的变位，观察模型的破坏形态。通常以特征部位测点的位移曲线上的突变点作为正常工作状态的安全评价指标，以结构整体失稳的超载安全系数作为岩体结构极限承载能力的评价指标。

参考书目

中国水利水电科学研究院，南京水利科学研究院．水工模型试验．2版．北京：水利电力出版社，1985.

周维垣，林鹏，杨若琼，等．高拱坝地质力学模型试验方法与应用．北京：中国水利水电出版社，2008.

dizhi niandai

地质年代　(geological age)　表明地质历史时期的先后顺序及其相互关系的地质时间系统。地质年代包括相对地质年代与绝对年龄。相对地质年代是指不同时代地层间相对的新老关系或形成先后次序；绝对年龄是表示地层岩石、矿物形成的实际年龄。确定地质年代是研究地壳地质发展历史的基础，也是研究区域地质构造和编制地质图的基础工作。

地质年代确定方法　相对地质年代主要依据地层层序、化石、岩性以及地层接触关系等确定。①地层层序法。未经后期变动情况下，沉积岩地层的层序是老的地层在下，新的地层在上。当发生倒转褶皱或逆掩断层等构造变动时，老地层才能覆盖于新地层之上。②化石法。在不同的地质年代均有其特有的生物，利用地层中所含的标准化石可确定其地质年代。③岩性比较法。按同一时代、同一环境下所形成的地层岩性特征大致相似的原则确定地层的相对年代。④岩层接触关系法。被岩浆岩侵入或穿插的地层，其地质年代较岩浆岩老，沉积在岩浆岩上的地层则较岩浆岩新。绝对年龄是根据岩石中所含的放射性同位素恒定的蜕变速度测定的。

地质年代与地层系统单位　国际上多以生物演化的不同阶段作为划分地层单位的依据，每一地层单位严格与地质时代单位相对应。国际上通常用宇、界、系、统等表示地层单位，用宙、代、纪、世等表示地质年代，相互对应。

地质年代表　2008年8月第33届国际地质大会推出了2008年版“国际地层地质表”。中国结合实际情况，也进行了地质年代表修订，但较为常用的仍是2000年版地质年代表，见表。与原地质年代表的差别在于年代和某些地层划分更为详细，如二叠系地层划分由原上、下统改为上、中、下统等。

中国及国际通用的地质年代表（2000年版）

地质时代、地层单位及其代号				同位素年龄（兆年）		构造阶段		生物演化阶段		中国主要地质、生物现象
宙(宇)	代(界)	纪(系)	世(统)	时间间距	距今年龄	大阶段	阶段	动物	植物	
显生宙(PH)	新生代(Kz)	第四纪(Q)	全新世(Q_4/Q_2)	2～3	0.012	联合古陆解体	喜马拉雅阶段（新阿尔卑斯阶段）	人类出现；无脊椎动物继续演化发展	被子植物繁盛	
			更新世(Q_P) 晚更新世(Q_3)		2.48 (1.64)					冰川广布、黄土生成
			更新世(Q_P) 中更新世(Q_2)							
			更新世(Q_P) 早更新世(Q_1)							
		新近纪(N)	上新世(N_2)	2.85	5.3			哺乳动物繁盛		西部造山运动，东部低平，湖泊广布
			中新世(N_1)	18	23.3					
		古近纪(E)	渐新世(E_3)	13.2	36.5					哺乳类分化
			始新世(E_2)	16.5	53					蔬果繁盛，哺乳类急速发展
			古新世(E_1)	12	65					
	中生代(Mz)	白垩纪(K)	晚白垩世(K_2)	70	135(140)		燕山阶段（老阿尔卑斯阶段）	爬行动物繁盛		（中国尚无古新世地层发现）
			早白垩世(K_1)							
		侏罗纪(J)	晚侏罗世(J_3)	73	208				裸子植物繁盛	造山作用强烈，火成岩活动矿产生成
			中侏罗世(J_2)							恐龙极盛，中国南山俱成，大陆煤田生成
			早侏罗世(J_1)							
		三叠纪(T)	晚三叠世(T_3)	42	250	联合古陆形成	印支海西阶段；印支阶段			
			中三叠世(T_2)							中国南部最后一次海侵，恐龙哺乳类发育
			早三叠世(T_1)							
	古生代(Pz) 晚古生代(Pz_2)	二叠纪(P)	晚二叠世(P_3)	40	290		海西阶段	两栖动物繁盛	蕨类植物繁盛	
			中二叠世(P_2)							世界冰川广布，新南最大海侵，造山作用强烈
			早二叠世(P_1)							
		石炭纪(C)	晚石炭世(C_3)	72	362(355)					
			中石炭世(C_2)							气候温热，煤田生成，爬行类昆虫发生，地形低平，珊瑚礁发育
			早石炭世(C_1)							
		泥盆纪(D)	晚泥盆世(D_3)	47	409			鱼类繁盛	裸蕨植物繁盛	
			中泥盆世(D_2)							森林发育，腕足类鱼类极盛，两栖类发育
			早泥盆世(D_1)							
	早古生代(Pz_1)	志留纪(S)	晚志留世(S_3)	30	439		加里东阶段	海生无脊椎动物繁盛；硬壳动物繁盛	藻类及菌类繁盛；真核生物出现	
			中志留世(S_2)							珊瑚礁发育，气候局部干燥，造山运动强烈
			早志留世(S_1)							
		奥陶纪(O)	晚奥陶世(O_3)	71	510					
			中奥陶世(O_2)							地热低平，海水广布，无脊椎动物极繁，末期华北升起
			早奥陶世(O_1)							
		寒武纪(∈)	晚寒武世(∈$_3$)	60	570(600)					
			中寒武世(∈$_2$)							浅海广布，生物开始大量发展
			早寒武世(∈$_1$)							

续表

地质时代、地层单位及其代号					同位素年龄(兆年)		构造阶段		生物演化阶段		中国主要地质、生物现象
宙(宇)	代(界)	纪(系)		世(统)	时间间距	距今年龄	大阶段	阶段	动物	植物	
元古宙(PT)	元古代(Pt)	新元古代(Pt_3)	震旦纪(Z/Sn)		230	800			裸露动物繁盛		地形不平，冰川广布，晚期海侵加广
			青白口纪		200	1000	地台形成	晋宁阶段			沉积深厚造山变质强烈，火成岩活动矿产生成
		中元古代(Pt_2)	蓟县纪		400	1400					
			长城纪		400	1800		吕梁阶段		(绿藻)	早期基性喷发，继以造山作用，变质强烈，花岗岩侵入
		古元古代(Pt_1)			700	2500				原核生物出现	
太古宙(AR)	太古代(Ar)	新太古代(Ar_2)			500	3000	2800 陆核形成				
		古太古代(Ar_1)			800	3800			生命现象开始出现		地壳局部变动，大陆开始形成
冥古宙(HD)						4600					

dizhi zaihai weixianxing pinggu

地质灾害危险性评估 (risk assessment of geological disaster) 在工程建设中对地质灾害发生的可能性和可能造成的损失进行综合估量，作出场地适宜性评价。地质灾害是指包括自然因素或人为活动引发的危害人民生命和财产安全的崩塌、滑坡、泥石流、地面塌陷、地裂缝、地面沉降等与地质作用有关的灾害。地质灾害危险性评估的任务是为工程建设项目的征地、建设、投资决策和地质灾害防治提供科学依据。

评估分级　根据地质环境条件复杂程度与建设项目的重要性，地质灾害危险性评估分一、二、三3个等级。①一级评估。对评估区内分布的地质灾害是否危害建设项目安全、建设项目是否诱发地质灾害、因治理地质灾害增大的项目建设成本等进行全面的评估。②二级评估。将地质灾害对建设项目的影响或危害以及建设项目是否会诱发地质灾害进行分析或专项分析，基本查明评估区内地质灾害的类型、分布、规模对拟建项目可能产生的危害及影响，预测评价工程建设可能诱发的灾害类型及危险性。当评估区内有重大地质灾害时，应参照一级评估要求进行评价。③三级评估。对建设用地范围内是否存在地质灾害及其潜在危险性进行定性分析确定，初步查明评估区地质灾害的类型、分布，工程建设可能诱发的地质灾害的类型、规模、危害以及对评估区地质灾害环境的影响。

评估内容　包括：①阐明工程建设区和规划区的地质环境条件基本特征；②调查分析工程建设区或规划区各种地质灾害的现状；③简要分析评估对象在建设或运营过程中与地质环境相互作用的范围、方式、强度与持续时间；④分析论证建设工程遭受地质灾害的可能性，工程建设中和运营中加剧或引发地质灾害的可能性；⑤进行地质灾害现状评估、预测评估和综合评估；⑥给出建设场地工程建设地质适宜性的评价结论；⑦针对不同建设阶段，提出防治地质灾害的地质工作意见和防治地质灾害的具体措施建议。

评估方法　包括现状评估、预测评估、综合评估。①现状评估。基本查明评估区已发生的主要地质灾害的分布，分析地质灾害形成的地质环境条件、分布、类型、规模、变形活动特征、主要诱发因素与形成机制，对其稳定性进行初步判定，在此基础上对其危险性和对工程危害的范围与程度作出评估。②预测评估。对建设工程自身可能遭受地质灾害的可能性、危险性和危害程度做出预测评估，对工程建设中、建成后可能引发或加剧地质灾害的可能性、危险性和危害程度做出预测评估；③综合评估。主要依据现状评估和预测评估的结果，充分考虑评估区的地质环境条件差异和潜在的地质灾害隐患点的分布、危险程度，综合评估地质灾害危险程度，依据地质灾害危险性、防治难度和防治效益，对建设场地的适宜性做出评估，提出防治地质灾害的措施和建议。

评估成果　一、二级评估应提交危险性评估报告书，三级评估提交危险性评估说明书。

dianli-dianliang pingheng

电力电量平衡 (supply and demand analysis in power system) 电力系统电力、电量和调峰容量的供需平衡。又称电力系统运行模拟。电力电量平衡用于研究各类电站在电力系统中优化运行方式及分系统间功率的优化交换，从而

核定各方案的容量和电量效益。它是电力规划、设计和运行计划的重要组成部分。

内容和对象　包括电力平衡、电量平衡和调峰容量平衡。研究内容按时间长短可分为日（周）平衡和年平衡。日（周）平衡的时段单位常用1h，年平衡的时段单位常用月、周或数月。研究对象可分为：①工作容量平衡；②检修容量平衡；③备用容量平衡；④电量平衡；⑤调峰容量平衡。

类型　根据系统负荷、水文和参加平衡的电站容量的随机性，电力系统电力电量平衡可分为确定型和随机型两种。确定型较简单、直观且实用；随机型较严密，但工作量大，不实用。

（1）确定型。按系统电力负荷、备用容量均为已知，水电站的水文为确定型。其平衡的条件是，各时段系统容量和电量均应满足负荷要求（含厂用电和输电损失）。

（2）随机型。电力负荷按随机变量处理，水电站的水文按随机型考虑（有时为了简化，水文按确定型考虑）。系统各电站参加平衡的机组数（或容量），取决于其强迫停运率（forced outage rate，FOR，机组因故障强迫停运的时间与强迫停运时间加运行时间之和的比值）。从概率的意义上说，系统的用电需求不可能完全满足，故模型的目标函数应按系统失负荷概率（lost of load probability，LOLP，系统有效发电容量不能满足负荷要求的概率）和所失负荷的重要性，计入与所失负荷相应的费用的数学期望值。

电力电量平衡条件　包括：

（1）系统电力负荷应为主网受端的用电负荷，不包括电站的厂用电和专用输电线路的线损，这部分厂用电及线损，应计入电力电量平衡中。

（2）系统工作容量平衡、检修容量平衡和备用容量平衡作为一个整体，结合进行。各类容量之间能相互转化。

（3）与设计保证率相应的设计枯水年的电力电量平衡，可确定电站的容量效益。电量效益则是对各种可能的水文情况进行电力电量平衡，求得其相应的数学期望值；也可简化处理，按水电站中水年（洪水频率 $P=50\%$）进行电力电量平衡求得。

（4）对分为若干区的较大的电力系统，电力电量平衡应包括各分区间的功率交换。

电力电量平衡原则　应在满足所列约束条件的前提下，使系统总费用最小：

（1）对确定型的电力电量平衡，在考虑厂用电和专用线损的前提下，系统电站的容量和电量均应满足系统负荷容量（含工作容量、备用容量和检修容量）和电量的需求。

（2）火电厂的机组出力应不小于其技术最小出力。

（3）水电站出力应尽可能满足强制基荷的要求。

（4）各类电站参加平衡的容量，应扣除由于不良工况而引起的不能发出的受阻容量。

（5）尽量减少电力系统总燃料消耗。

电力电量平衡计算　内容包括检修容量平衡、工作容量平衡、备用容量平衡、调峰容量平衡及其优化方法。

（1）检修容量平衡。检修容量是指计划安排系统中发电机组进行年检修的容量。系统内每台机组均需定期分别安排连续的大修时间，在规划设计中，每台机组年平均检修时间，燃煤机组常用45天；常规水电站常用30天，但对于多沙河流上的水电机组，可适当增加；抽水蓄能机组和燃气轮机常用30天；核电机组常用60天。系统中每台机组的容量乘以每年所需的大修历时，叫做机组所需的检修面积。机组检修时，应首先利用系统负荷季节性下降部分安排检修，当负荷季节性下降部分不敷检修时，应增加电力系统装机容量。根据水电站的特性，水电站的机组检修季节应避开汛期和负荷大的月份，宜安排在枯水期。火电机组则宜安排在丰水期。在常规计算中，即可根据上述原则，逐台安排机组检修，直至安排完所有机组为止。优化计算，可用纯整数规划的方法解决，即以0-1变量描述机组的检修计划，0为不检修，1为检修。目标函数可用系统总费用最小或电力系统平均装机容量为最小，但计算工作量很大。另一种方法是搜索法，其优点是速度快，且其结果也接近最优。在宏观规划中，常用较粗略的方法，即在每个电站的装机容量中，扣除其每年应检修的份额，如水电站按每年检修1个月计，即扣除其容量的1/12后进行平衡。

（2）工作容量平衡。一年中各月，以日或周为代表进行平衡。所有各电站扣除厂用电和专用线损后的主网受端各小时出力（含功率交换）之和，应等于主网受端相应各小时的负荷。

日或周的平衡，通常采用切负荷的方法，逐个电站进行平衡。当一个电站平衡完毕后，将该电站已分配的负荷及电量累积曲线有关部分切去，形成新的负荷曲线和电量累积曲线，据此再进行下一个电站的平衡。按经济性原则，水电站不耗燃料，故应首先利用其容量和电量最先引入，进行平衡，水电站中各电站的次序则根据调节能力、投产时间先后顺序安排。其次引入火电厂，火电厂中各电厂则应按燃料费用（含厂用电及线路损失）从低到高的次序进行平衡。抽水蓄能电站则应按综合效率从大到小的次序引入，进行平衡。

各类电站工作容量的平衡有不同的方法：①水电站按径流调节计算得到的月平均出力，换算成工作日（周）的能量，按充分利用其容量和电量的原则进行平衡（见工作容量）。②火电厂从电量累积曲线的原点起，按其工作容量向上安排其工作位置。应校核是否满足技术最小出力的其他要求，若不能满足，则应按后进先出的原则，减少已引入电站在负荷低谷时的出力，使之满足。③抽水蓄能电站应分别进行发电和抽水工况的平衡，发电能量不应大于抽水能量与其综合效率的乘积。

（3）备用容量平衡。其中包括事故备用容量和负荷备用容量的平衡。用于确定型的电力电量平衡，需遵循的原则有：①系统所有电站总备用容量之和，应大于或等于系统需要的备用容量。②水电站所担负的备用容量，应有足够的库容保证水电站的备用能量。若水电站主要备用库容设在上游水库，则还应在本梯级设置缓冲库容，以保证当上游电站下泄的备用水量到达本电站前的用水需要。③火电厂所担负的备用容量，应不大于机组最大出力与技术最小出力的差值，并应有备用燃料。④长引水道电站，应少担负或不担负备用容量。

（4）调峰容量平衡。调峰能力为当日开机容量（当日参加运行的各机组额定容量之和）中的可调容量（装机容量中可以被调度利用的容量，是除正在检修机组的容量外，其他

机组额定容量减去相应受阻容量后可被利用运行的容量）与开机容量的技术最小出力之差。火电厂一般可采用当日开机容量中的额定出力与相应容量的技术最小之差，常规水电站一般可采用可调容量与强迫基荷之差，抽水蓄能电站可采用低谷抽水容量与开机容量中的可调容量之和，核电机组一般不考虑调峰能力。当各类电源总的调峰能力大于或等于典型日负荷峰谷差与旋转备用容量之和时，系统调峰容量平衡，否则调峰能力不足。

（5）优化方法。常用电力电量平衡的模拟模型多为线性规划模型。较严格的方法是，将水电站（群）的补偿径流调节计算与系统电力电量平衡在同一个模型中进行，这样可使水电站（群）水库调度的优化与电力电量平衡的优化有机地结合起来。模拟模型对系统工作容量的平衡，均将系统负荷按从大到小的次序排列，化为负荷历时曲线（台阶状的负荷）。为了减少非零元素，常用Z替代法处理，即将电站在各时段所担负的负荷，换算为与相邻“台阶”的差值。优化方法可考虑火电厂的非线性煤耗特性，同时解决各电站在系统中的最优运行方式、分系统间的错峰（即各分系统最大负荷非同时出现）和最优的功率交换（见水能利用优化）。

电力电量平衡可用平衡表或平衡图表示。电力电量平衡图如图1～图3所示。

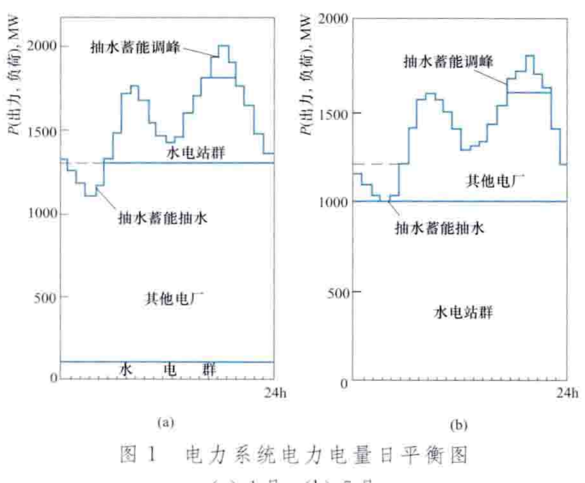


图1 电力系统电力电量日平衡图

（a）1月；（b）7月

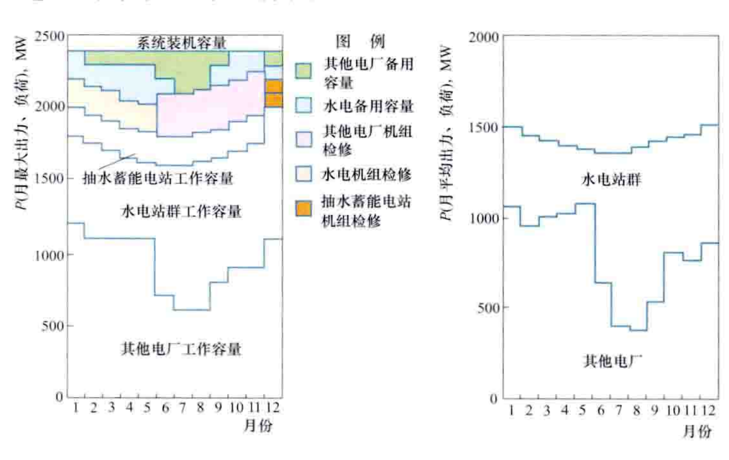


图2 电力系统年电力平衡图

图3 电力系统年电量平衡图

dianqiliang celiang

电气量测量 (measurement of electrical parameters)

水电站机电设备运行中电气参数的检测技术。主要测量电流、电压、有功功率、无功功率、功率因数、频率、电能及功角等电气量，以供控制、调节、监视、制表记录、数据传输之用。这些电气量通常采用交流采样综合测量仪表进行检测和显示，也可以通过电量变送器检测并配指针式或数字式常规仪表显示，还可利用保护测控单元的测量功能检测和显示。

电流测量　分交流电流测量和直流电流测量。在发电机定子回路、变压器、输电线路、厂区配电线路、母联断路器、母线分段断路器、旁路断路器和桥断路器、55kW及以上的电动机回路等处测量交流电流；在发电机励磁回路、蓄电池组充电回路、浮充电回路测量直流电流。

电压测量　分交流电压测量和直流电压测量。在发电机定子回路、各级电压母线等处测量交流电压，在发电机励磁回路、蓄电池组的直流母线、充放电回路等处测量直流电压。有些交、直流电压测量仪表还兼作有关回路的绝缘测量。

功率测量　分有功功率测量和无功功率测量。在发电机定子回路、励磁变压器高压侧、升压变压器、厂用变压器、3kV及以上的输电线路、旁路断路器、母线联络兼旁路断路器、分段兼旁路断路器等处均需测量有功功率和无功功率。对有可能送、受电运行的输配电线路，发电/电动机和主变压器等设备，应测量双方向功率。

功率因数测量　在发电机定子回路、主变压器高压侧进行测量。

频率测量　在发电机定子回路、高压母线进行频率测量，在中央控制室装设一只监视电力系统频率的数字显示式频率表。

电能计量　在发电机定子回路、变压器、输电线路、旁路断路器、母线联络兼旁路断路器、母线分段断路器、厂用变压器、厂区配电线路等处装设有功电能表；可作调相运行的发电机和抽水蓄能电站的发电电动机装设两只具有止逆机构的有功电能表。在发电机定子回路、升压变压器、输电线路、旁路断路器、母线联络兼旁路断路器和分段旁路断路器等处装设无功电能表；对于抽水蓄能电站的发电电动机，装设两只具有止逆机构的无功电能表。有的水电站还装设全厂电能总加装置或由计算机监控系统实现电能总加。

功角测量　当发电机存在进相运行的方式且系统有要求时，宜测量发电机内功角。

交流采样综合测量仪表　对交流工频电量直接采样，送到数据处理单元进行处理后，得到电压、电流、有功功率、无功功率、功率因数、频率、有功电能、无功电能等参数，并能通过标准通信接口输出的多功能智能仪表。

变送器　将被测量转换为直流电流、直流电压或数字信号输出的装置。

指针式仪表　将被检测的电气量转换成测量机构可动部件的偏角位移带动指针偏转。技术较简单，监视较直观，被广泛使用。

数字式仪表　将被检测的电气量变换为数字显示。特点是便于直接读数、反应快、精度高。

保护测控单元　利用保护装置的测量功能对电气量进行检测。

dieliang zhamen

叠梁闸门 (stoplog gate) 若干单独的横梁，逐根放入门槽叠合组成的挡水设备。单梁可按孔口宽度和挡水水头，选用单一材料或组合材料（如钢、钢筋混凝土等）制成。叠梁虽有结构简单和起吊力小等特点，但因叠合缝较多，易漏水且操作费时，一般用作检修闸门或临时挡水结构。

为防止叠梁漏水量过大，除注意控制单梁结构的制造偏差，以保证单梁水封的严密性和多梁叠放时水封的连续性外，还可采取在挡水面覆盖防漏材料等临时措施。也有设两道叠梁，在两道叠梁间填黏土来防止漏水的工程实例。

工程中还采用一种浮式叠梁。它的单根梁能漂浮露出水面，多梁沿门槽高度叠放时，又能逐根压入水下挡水；每根梁在起吊或下放时，均可浮出水面，便于挂钩或脱钩操作，运行管理较为方便。

dinggai

顶盖 (head cover) 支承导叶上轴颈、中轴颈、导轴承及主轴伸出侧并构成过流表面的封水部件。大中型水轮机的顶盖广泛采用钢板焊接结构。如受运输条件的限制，可以分成两半或4瓣，用螺栓组合。小型水轮机的顶盖可采用铸造结构。

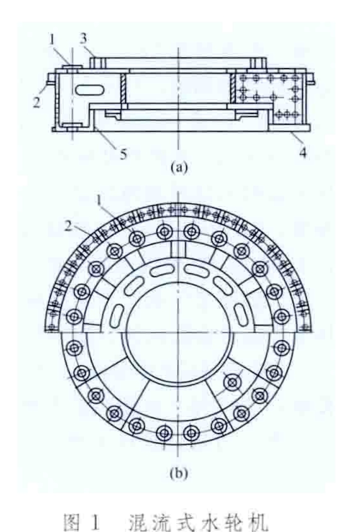


图1 混流式水轮机焊接顶盖
(a) 剖面图；(b) 平面图
1—上轴承孔；2—外法兰；3—环形滑槽；4—抗磨板；5—固定止漏环

顶盖采用箱形结构，导叶的上轴承均匀布置在顶盖的圆周上。顶盖用外法兰固定在座环上。混流式水轮机顶盖见图1。在主轴伸出处设置密封装置及固定水轮机导轴承。顶盖上设有供支承控制环用的环形滑槽。顶盖下部过流表面铺设抗磨板，和转轮止漏环相对的位置装有固定止漏环。大中型轴流式水轮机顶盖内还装有支持盖，这样在检修转轮时不必拆卸顶盖和导叶，主轴密封、导轴承、控制环滑槽等都设在支持盖上。轴流式水轮机焊接顶盖见图2。

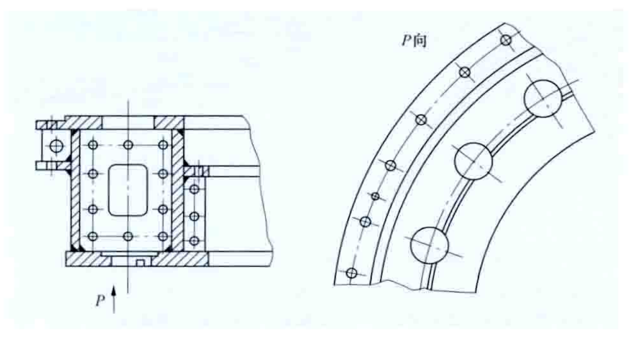


图2 轴流式水轮机焊接顶盖

ding'e

定额 (quota) 单位产品或工作中，人工、材料、机械及资金合理消耗量的规定额度。定额反映了一定生产力发展阶段相对稳定的生产消费水平，具有科学性、系统性、稳定性和时效性等特点。定额水平与生产力水平不相适应时，需重编或修订。除施工定额由企业内部编制使用外，定额一般由行业主管部门组织编制。

水电工程建设定额通常为实物量消耗定额，个别的采用价目表或费率形式。

水电工程建设定额按用途分为施工定额、预算定额、概算定额、造价指标等；按费用性质分为建筑工程定额、设备安装工程定额、施工机械台时费定额。

施工定额 一般根据生产报表和工效统计资料编制而成。主要在施工企业内部组织生产、加强管理、编制施工预算、考核评奖以及投标报价时使用。

预算定额 在施工定额基础上，以主要工序为主，综合数个相关工序子目，并考虑一定的耗量扩大系数，综合扩大编制而成。主要在招标设计阶段编制标底、投标报价，施工详图设计阶段编制施工图预算时使用。

概算定额 在预算定额基础上综合扩大编制而成。主要在可行性研究阶段开展技术经济比较及编制设计概算时使用。用于编制投资匡算、估算时，定额人工、机械消耗量应乘扩大系数。

造价指标 以概算定额和技术经济统计资料为基础，综合扩大编制而成。在规划、预可、可研等设计阶段，当非主体工程造价难于用定额进行编制时使用。

建筑工程定额 建筑工程各类、各种工序中人工、材料、施工机械、资金消耗的额度。包括土方工程、石方工程、堆砌石工程、混凝土及模板工程、锚喷支护工程、基础处理工程等。

设备安装工程定额 安装工程各类、各种工序中人工、材料、施工机械、资金消耗的额度。包括水轮机、发电机、进水阀、水泵、电气设备、变电站设备、起重设备等设备安装，以及闸门和压力钢管制作安装。

施工机械台时费定额 单台施工机械正常工作运转1小时，人工、材料及资金的合理消耗额度，由第一类费用、第二类费用和第三类费用组成。第一类费用包括折旧费、设备修理费、安装拆卸费等费用。第二类费用包括人工、动力燃料或消耗材料等费用。第三类费用包括车船使用税、年检费等费用。

dingxiang baopo

定向爆破 (directional blasting) 使被爆介质（如岩土体、矿物体等）沿着预定方向抛掷堆积成一定形状的爆破技术。定向爆破利用物质首先从最薄弱环节破坏的原理，使爆破介质沿从药包中心到自由面的最短距离，即最小抵抗线方向抛掷。这种自由面可以是天然地形，也可以利用辅助药包预先爆破形成新临空面，使一定数量的岩石在爆破过程中向预定方向较为集中地堆积成一定形状。

定向爆破一般是按爆堆要求确定爆破范围，在一定的爆破范围内进行药包布置和参数选择、抛掷堆积计算，并以爆堆的优劣评价药包布置的合理程度。定向爆破常常用定向中

心布药法，即把堆积体重心定为定向中心，利用天然凹面或人工开创的凹面，以主爆破药包的最小抵抗线指向定向中心布置药包。爆破炸药用量可按抛掷爆破的药量计算公式进行计算。定向爆破药室的装药、封堵、起爆要求与洞室爆破相同。

中国于1960年在广东省南水水电站用定向爆破筑坝，坝高81.3m，库容12.7亿m³，装机容量75MW。苏联于1966年在努列克水电站施工中用定向爆破法堆筑围堰，堰体高75m，渗流量为200L/s，堰顶曾遭洪水漫溢，未受损坏。

Dongfeng Shuidianzhan

东风水电站 (Dongfeng Hydropower Station)

位于中国贵州省清镇县、黔西县境内，距贵阳市88km。电站装机容量510MW，多年平均年发电量24.2亿kW·h。用3回220kV输电线路接入贵州电力系统。2003年机组改造后，装机容量增容至570MW。2004年扩机装机容量125MW，多年平均纳入系统电量2.78亿kW·h，以1回110kV出线至已有的110kV出线站，见图1。



图1 东风水电站

水文和水库特性 坝址以上流域面积18 161km²，多年平均流量345m³/s，多年平均年径流量108.9亿m³。100年一遇设计洪水流量11 000m³/s，1000年一遇校核洪水流量14 400m³/s。对应水库正常蓄水位970.00m，死水位936.00m，总库容10.25m³，调节库容4.91亿m³，属季调节水库。

工程地质条件 坝址区地层为三叠系下统永宁镇组灰岩、白云岩和白云质灰岩，岩性坚硬，喀斯特发育。大坝建基面以下50～60m处有半坚硬完整的九级滩页岩，作为良好隔水层。

枢纽布置 枢纽工程由大坝、泄水建筑物、引水发电系统和扩机工程等组成，见图2。

大坝 双曲混凝土拱坝，坝顶中心弧长254m，中心角64.56°～94.1°；坝顶高程978.00m，最大坝高162m，坝顶宽6m，最大底宽（厚）25m，厚高比为0.16。

泄水建筑物 坝身设有3个表孔和3个中孔。表孔孔口尺寸为11m×7m，底坎高程967.00m，校核情况泄流量为2250m³/s。中孔的2个边孔孔口尺寸为5m×6m，中间孔孔口尺寸为3.5m×4.5m，底坎高程为890.00m，校核情况泄流量为2620m³/s。左岸设1条无压泄洪洞，进口顶高程为950.00m，隧洞尺寸为12m×17.5m，校核情况泄流量为3376m³/s。岸边开敞式溢洪道1孔，进口堰顶高程为950.00m，孔口尺寸15m×21m，校核情况泄流量为4200m³/s。

引水发电系统 位于右岸，3条洞径均为6.5m的压力引水隧洞，每条隧洞后接内径为6m的压力钢管，引水道平均长约227m。地下厂房，长105.5m，宽21.7m，高47.94m。厂房内安装3台混流式水轮发电机组，单机容量170MW，增容后单机容量190MW，转速187.5r/min，水轮机转轮直径4.5m，额定流量160.5m³/s，最高效率95.5%，设计点效率93.88%，吸出高度−4.5m。主变压器洞，内设3台200MW的三相变压器。220kV高压配电装置为气体绝缘金属封闭电器，设在地下。

扩机工程 由坝身进水口中、右岸引水系统和地下厂房组成，引水管长299.6m，洞径5m。地下厂房布置在东风水电站原导流洞内，厂房长47.6m、宽17.5m、高43.8m，厂内安装1台125MW混流式水轮发电机组，转速214.3r/min，水轮机转轮直径3.5m，额定流量117.5m³/s，尾水洞利用原导流洞改建，长79.1m。开关站采用地下GIS布置，以1回220kV出线接入东风发电厂220kV GIS母线，以1回110kV出线至已有的110kV出线站。

工程施工 施工导流采用过水围堰、隧洞导流方案。坝体3个临时底孔用作后期导流。

工程于1984年筹建，1989年截流，1994年第一台机组发电，1995年3台机组全部投产。2003年底完成机组改造。2004年4月进行扩机工程，2005年底投产。

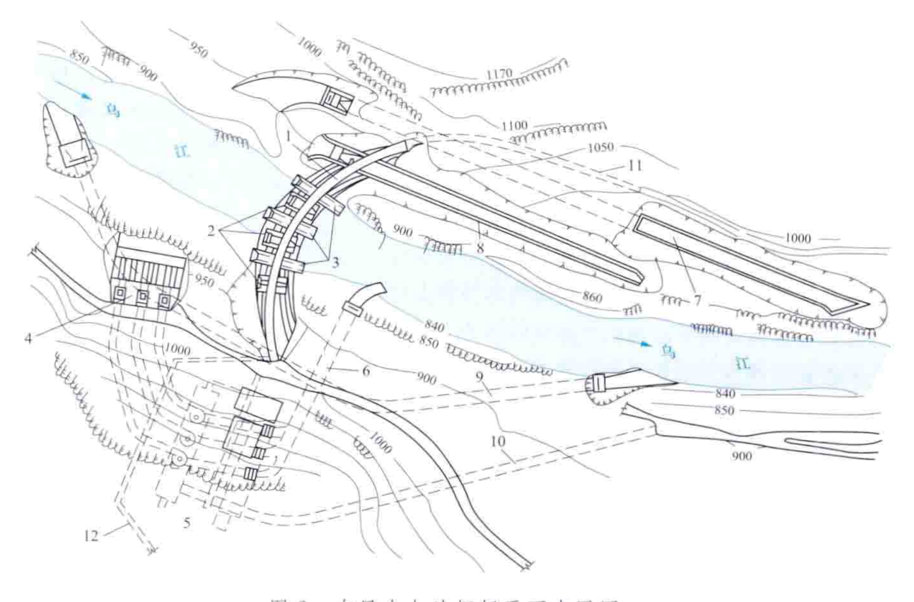


图2 东风水电站枢纽平面布置图

1—混凝土双曲拱坝；2—坝身表孔；3—坝身中孔；4—电站进水口；5—地下厂房；6—电站尾水隧洞；7—泄洪隧洞；8—溢洪道；9—导流隧洞；10—电厂交通洞；11—上坝公路隧洞；12—帷幕灌浆廊道

主要工程量：土石方开挖 213 万 m³，混凝土浇筑 114 万 m³，帷幕灌浆 32 万 m。扩机工程主要工程量：石方洞挖 5.96 万 m³，混凝土浇筑 2.62 万 m³，钢筋及钢材 2100t。

设计单位 贵阳勘测设计研究院（现中国水电顾问集团贵阳勘测设计研究院）设计，中南勘测设计研究院（现中国水电顾问集团中南勘测设计研究院）承担引水发电系统部分技施设计。

Dongjiang Shuidianzhan

东江水电站 （Dongjiang Hydropower Station）

位于中国湖南省资兴市境内，距郴州市 45km，湘水支流耒水梯级开发的控制性工程。电站开发任务以发电为主，兼有防洪、航运、工业用水等综合利用效益。装机容量 500MW，多年平均年发电量 13.2 亿 kW·h。以 3 回 220kV 线路接入湖南省电力系统，见图 1。



图 1 东江水电站

水文和水库特性 坝址以上流域面积 4719km²，占耒水总流域面积的 39.6%。多年平均流量 144m³/s，多年平均年径流量 45.4 亿 m³。1000 年一遇设计，洪峰流量 13 900m³/s，相应库水位 289m；10 000 年一遇加 20% 校核，洪峰流量 24 100m³/s，相应库水位 293.4m，总库容 91.5 亿 m³。正常蓄水位 285.00m，相应库容 81.2m³，死水位 237.00m，调节库容 56.7 亿 m³，属多年调节水库。

工程地质条件 坝基岩体为花岗岩，岩性均一，坚硬完整，断裂不发育。坝址基本地震烈度Ⅶ度，设计烈度 8 度。

枢纽布置 枢纽工程由大坝、泄水建筑物、厂房和木材转运设施等组成，见图 2。

大坝 变圆心、变半径双曲拱坝，最大坝高 157m，坝顶高程 294.00m，坝顶弧长 438m，坝顶宽 7m，最大底宽（厚）35m，厚高比 0.223，最大圆弧半径 309.3m，最大中心角 95°。右岸 270m 高程以上设置重力墩。

泄水建筑物 潜孔滑雪式溢洪道布置在坝体两侧，右岸 2 孔，左岸 1 孔。进口底坎高程 266.00m，孔口尺寸 10m×7.5m（宽×高），总泄量 4416m³/s。右岸溢洪道尾部采用窄缝式挑坎，左岸溢洪道尾部采用扭曲挑坎消能。一级洞布置在左岸，用作水库放空兼泄洪，有压段洞径 10m，无压段断面尺寸为 8.5m×12m，进口底坎高程 222.00m，最大泄量 2000m³/s。二级洞布置在右岸，用作水库放空、后期导流及下闸蓄水期间向下游供水，有压段洞径 8.9m，无压段断面尺寸 7.2m×12m，进口底坎高程 170.00m，最大泄量 1625m³/s，装设偏心铰弧形闸门控制。

厂房 位于坝后，长 106m、宽 23m、高 56m。厂内安装 4 台机组，单机容量 125MW。水轮机为混流式，转轮直径 4.1m，额定转速 166.7r/min。发电机为伞式空冷型，额定容量 147.06MV·A，额定功率因数 0.85，额定电压 13.8kV。厂坝之间布置有副厂房、4 台容量为 150MV·A 的主变压器、220kV 气体绝缘金属封闭电器室等。

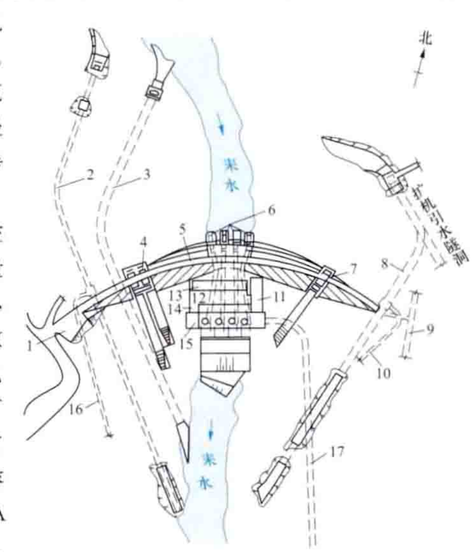


图 2 东江水电站枢纽平面布置图

1—重力墩；2—二级放空洞；3—导流洞；4—右滑雪式溢洪道；5—拱坝；6—电站进水口；7—左滑雪式溢洪道；8—一级放空（兼泄洪）洞；9—交通洞；10—交通通风洞；11—副厂房；12—变压器场；13—开关站；14—开关室；15—主厂房；16—交通通风洞；17—进厂交通洞

木材转运设施 库内坝上游 5.5km 处的长盈头木材集运场，设计年集运木材 30 万 m³，采用汽车运输。

工程施工 施工导流，初期采用枯水期隧洞导流、汛期围堰过水方式，后期采用导流洞与放空洞导流、坝身不过水的导流方式。工程于 1978 年 3 月开工，1987 年 10 月第一台机组发电，1988 年 6 月全部机组投产。

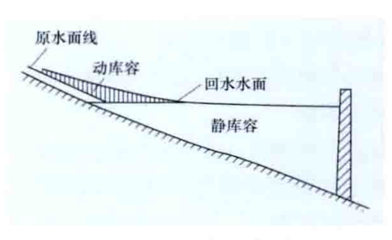
主要工程量：土石方开挖 118 万 m³，混凝土浇筑 153 万 m³，帷幕灌浆 4.5 万 m，固结灌浆 4.2 万 m，钢筋钢材 2.3 万 t。

设计单位 中南勘测设计研究院（现中国水电顾问集团中南勘测设计研究院）。

dongkurong

动库容 （dynamic storage capacity）

水库回水水面与坝前水位水平面之间的楔形水库容积。坝前水位水平面以下的水库容积叫做静库容。动库容一般集中在水库变动回水区，见图。地形开阔、河道比降较小的水库，动库容相对较大。入库流量越大，水库末端回水水面上翘越高，动库容越大。因此，当库区发生洪水时，动库容更为明显，其变化可用下式表示



水库动库容简图

$$dV = dQ + dZ$$

式中 V 为库容，m³；Q 为库区来水流量，m³/s；Z 为水库

水位，m。

动库容对调洪的影响　一些大型水库实测成果表明，考虑动库容调洪与不考虑动库容调洪相比，调洪的成果更接近实际，其蓄洪水位有高有低，这主要同水库地形、泄洪设施以及洪水过程等因素有关。

动库容的调洪计算　动库容法调洪计算。方法与静库容调洪计算基本相同（见洪水调节），只是库容及水位根据库区沿程变化的流量通过回水计算分析试算求得。

参考书目

华东水利学院，叶秉如．水利计算．北京：水利电力出版社，1985.

donglixue

动力学

(kinetics)　以牛顿定律和万有引力定律为基础，研究物体机械运动状态变化规律的力学分支学科。动力学的研究对象是运动速度远小于光速的宏观物体，是物理学、天文学以及许多工程学科的基础。动力学基本内容包括质点动力学、质点系动力学、刚体动力学、固体动力学和流体动力学（包括液体动力学、气体动力学等）等。以动力学为基础而发展起来的相关学科有天体力学、振动理论、运动稳定性理论、陀螺力学、外弹道学、变质量力学以及多刚体系统动力学等。

动量、动量矩和动能是描述质点、质点系和刚体运动的基本物理量。作用于物体上的力或力矩，与这些物理量之间的关系构成了动力学普遍定理，包括动量定理、动量矩定理、动能定理以及由这三个基本定理推导出来的其他定理。

质点动力学和质点系动力学　质点动力学将物体看成是有质量无大小的点，即质点，研究的是质点运动（或振动）与作用于质点的力和质点质量之间的关系。质点动力学有两类基本问题：一是已知质点的运动，求作用于质点上的力；二是已知作用于质点上的力，求质点的运动。质点系动力学是在质点动力学的基础上，进一步考虑质点与质点之间相互作用的内力。

刚体动力学　将物体视为刚体，不考虑物体在外力作用下的内部响应，研究物体在外力作用下的运动规律，刚体动力学是机器部件的运动，舰船、飞机、火箭等航行器的运动以及天体姿态运动的力学基础。

固体动力学　研究固体结构动力响应与动荷载、固体结构特性和固体结构基础约束之间的关系。与刚体动力学不同，固体动力学不仅研究结构物的动力响应（速度、加速度等），还研究结构物的内部响应（位移、应变、应力等）及损伤、破坏等。与固体动力学相关的研究领域包括弹性动力学、结构动力学、岩土动力学等。

流体动力学　研究运动中的流体（液体和气体）的状态与规律。其中，液体动力学的研究对象是不可压缩的液体，水电工程中主要以水动力学研究为主，水动力学研究水流运动与水流压力、边界约束和水流特性（密度、黏滞性等）之间的关系。气体动力学主要研究气体运动与气体压力、边界约束和气体特性（密度、温度、黏滞性、压缩性等）之间的关系，以及气体与相对运动物体的相互作用。

dongtai touzi (shuidian)

动态投资（水电）

(dynamic investment of hydropower project)　在项目建设期间，投资随市场价格、政策变动而发生变化的部分，以及预计所需的利息支出。是工程总投资的一部分，包括工程价差预备费和建设期利息。工程价差预备费是工程建设期间由于物价超过静态投资价格水平导致发生的价差。建设期利息是项目法人除资本金以外，采取向国内外金融机构贷款、发行债券等各种融资手段获得的建设资金，需在建设期内归还的利息和各种手续费用。水电站工程建设周期较长，预测价差预备费和利息所采用的价格指数和利率，在工程建设过程中经常变化，投资也随之变动。项目法人需按动态投资的增减及时调整资金筹措和使用计划。

dongnei xiaonenggong

洞内消能工

(dissipator within tunnel)　设于隧洞内的一种消能设施。这种消能工的特点是将宣泄水流的巨大能量，部分消煞在隧洞水流行进中，将泄流时承受高速水流作用的范围减小，并将剩余的部分能量传递至下游，使高速水流空化或泥沙磨蚀作用，以及上、下游水流衔接条件得到控制和改善。洞内消能工适用于把大型导流隧洞改建成高落差、大流量泄水建筑物。

类型　常见的洞内消能工有突扩式、涡流式、竖井或斜井式、塔内式、混合式等几类。

(1) 突扩式。包括孔板式（见图1）、洞塞式，又分为单孔突扩式和多孔突扩式压力消能工。

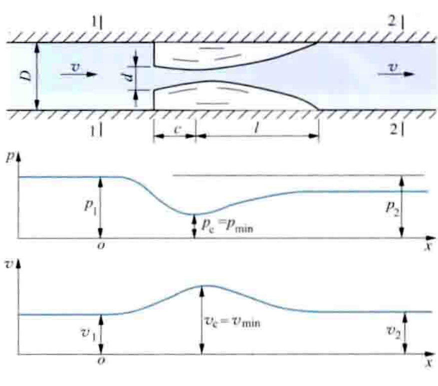


图1　孔板式洞内消能工示意图
D—隧洞直径；d—孔板区进口孔径；
c—孔板区收缩段长度；l—孔板区扩散段长度；
p—隧洞内水压力；v—水流流速

(2) 涡流式。见图2，包括水平洞、斜井和竖井造涡型，单反向螺旋型，明流、压力流涡旋型等。

(3) 竖井或斜井式。包括有竖井消能室和无竖井消能室。

(4) 塔内式。包括溢流式、多孔对冲（或斜冲）和多层混合消能式。

(5) 混合式。包括突扩和涡旋相结合，对冲与涡旋结合等。

工程实例　加拿大的麦卡（Mica）坝，坝高244m，将直径为13.7m的导流洞改建成泄洪洞，洞内设置洞塞式三叶型孔口突扩式洞内消能工，将52m/s的高速水流降至35m/s以下，消煞能量50%以上。中国小浪底工程中，将直径14.5m的导流洞改建成泄洪洞，洞内设3级孔板式洞内消能工，泄流量1730m³/s。公伯峡水电站右岸导流隧洞改建成竖井水平旋流泄洪洞，泄流量约1050m³/s，于2006年8月进行了原型

观测，为第一个通过原型观测检验的旋流泄洪洞。

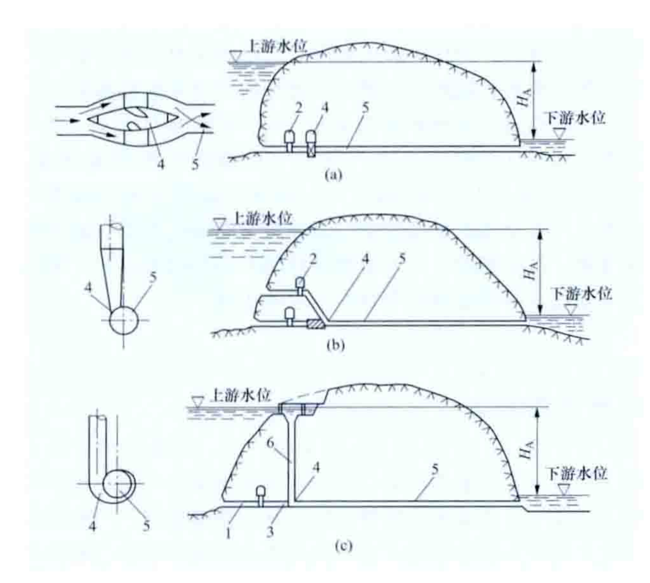


图2 涡流式洞内消能工示意图

(a) 具有涡流阀门的；(b) 具有切向涡流激发器的；

(c) 具有蜗壳式涡流激发器的

1—施工导流泄水道；2—闸室；3—混凝土塞；

4—造涡设施；5—退水隧洞；6—竖井

dongshi baopo

洞室爆破 (chamber blasting) 按设计要求将炸药装填在专门的洞室或巷道中，并用土、石料封堵后起爆的爆破技术。洞室爆破具有效率高、投资省、进度快、所需机械设备简单、气候适应性强等优点，适用于土石方大量开采、定向爆破筑坝、路基开挖、平整场地、移山填海、航道疏浚等大型爆破作业，是各项基本建设土石方工程广泛采用的施工方法。但洞室爆破施工组织工作复杂，一次起爆的药量大，对保留岩体的破坏及周围建筑设施的安全影响较大，使用时需十分谨慎。

洞室爆破要预先开挖药室洞穴和进入药室的导洞。药室数量、位置、形状、大小根据地形、地质条件和工程设计要求确定。药包布置方式有集中药包、条形药包两种，一般多采用集中药包。炸药用量一般采用单药包爆破药量的经验公式，按爆破每立方米岩石的单位耗药量和最小抵抗线长（即自药包中心至被爆岩体表层的最短距离）计算。工程实践及研究分析表明，条形药包施工简单，爆破效果好，爆破破坏范围及振动较小，凡能布置条形药包的地方应布置条形药包或部分布置条形药包。进入药室的导洞可用平洞、斜井或竖井，断面尺寸根据施工要求决定，平洞尺寸不宜小于0.8m×1.5m（宽×高），竖井断面面积不宜小于$1m^2$，并在洞口或井口附近设置临时堆放炸药的场地。在装填炸药的过程中，需用36V以下低压电源照明。在安置起爆药包时，切断一切电源，使用矿用蓄电池灯或安全手电筒照明。洞室爆破一般采用双重电爆网络或电爆与导爆索（管）网络起爆，在多雷地区可采用双重导爆索或非电导爆管起爆网络。起爆网络的设计、施工必须高度重视各洞室之间的相互影响和起爆顺序。导洞用土石等当地材料堵塞，堵塞长度一般不小于1.2倍最小抵抗线长。

GB 6722—2011《爆破安全规程》规定，露天洞室爆破分为A级（装药量$Q \geqslant 1000t$）、B级（$250t \leqslant Q < 1000t$）、C级（$50t \leqslant Q < 250t$）和D级（$5t \leqslant Q < 50t$）四级，爆破作业安全至关重要，应严格按照爆破作业基本规定执行。对A、B级爆破，重要爆破以及可能引起纠纷的爆破，均应进行爆破效应监测及安全监测，重大洞室爆破工程还应进行现场小型试验爆破。

duli feiyong

独立费用 (other expenses) 在水电站工程投资中，不宜列入枢纽工程投资和建设征地移民安置补偿费用内，需要单独列项的其他费用。包括项目建设管理费、生产准备费、科研勘察设计费和其他税费等部分。

项目建设管理费　工程项目在立项、筹建、建设和试生产期间发生的各种管理性费用，包括工程前期费、工程建设管理费、建设征地和移民安置补偿管理费、工程建设监理费、咨询服务费、项目技术经济评审费、项目验收费和工程保险费。这部分费用一般按建筑安装工程费、永久设备费、建设征地移民安置补偿费的百分比计算。

生产准备费　建设项目法人为准备正常的生产运行所需发生的费用。包括生产人员提前进厂费、培训费、管理用具购置费、备品备件购置费、工器具及生产家具购置费和联合试运转费。一般按工程永久设备费的百分比计算。

科研勘察设计费　工程建设所需发生的施工科研试验费和勘察设计费。施工科研试验费按建筑安装工程费的一定百分比计取；勘察设计费根据国家有关工程勘察设计收费管理规定计算。

其他税费　根据国家有关规定需要交纳的其他税费。包括对项目建设用地征收的耕地占用税、耕地开垦费、森林植被恢复费，以及水土保持设施补偿费等。按国家规定的有关税费标准计算。

duanceng

断层 (fault) 沿岩土体在构造应力作用下的破裂面产生相对错动的构造（带）。岩层或岩体在区域地质构造应力作用下，当构造应力超过岩石的极限强度时，导致岩石破裂，两侧岩层发生相对错动。主要错动面及其间经挤压错动而破碎的物质称断层破碎带。断层破碎带两侧一定宽度范围内，岩层仍较破碎，称断层影响带，见图1。



图1　黄河八里胡同大断层

断层要素　包括断层面、断盘、断层线、断层产状和断距。断裂错动面称断层面；断层两侧岩层称断盘，断层面以

上的一侧称上盘，以下一侧称下盘；断层面在地面的出露线称断层线；断层面的走向、倾向和倾角三要素称断层产状；沿断层两侧岩层相对错动的距离称断距。

断层分类　按断层两侧相对错动方向，可以把断层分为逆断层，正断层，平移断层，平移正、逆断层及旋转断层5类（见图2）：①逆断层是上盘沿断层面相对向上错动，下盘相对向下错动的断层。通常又将断层面倾角小于30°的逆断层称为逆掩断层。②正断层是上盘沿断层面相对向下错动，下盘相对向上错动的断层。断层面倾角多大于50°。③平移断层是两盘沿断层面作相对水平位移的断层。断层面常近于直立。④平移正、逆断层是两盘沿断层面兼具上下和水平位移的斜向错动断层。⑤旋转断层是断盘绕铅直轴或水平轴旋转位移的断层。

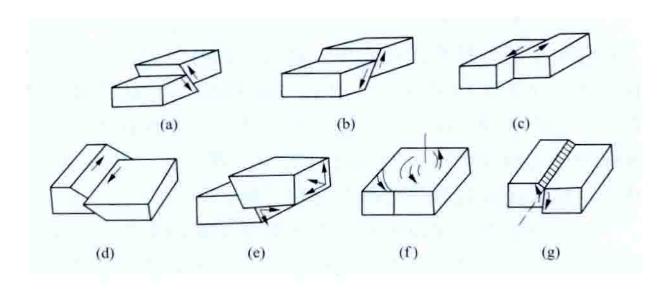


图2　断层分类示意图

（a）逆断层；（b）正断层；（c）平移断层；（d）、（e）平移正、逆断层；（f）、（g）旋转断层（沿铅直轴、水平轴）

断层的工程地质性质　包括：①逆断层面呈舒缓波状，有时有镜面，挤压面常集中出现构成挤压带，断层面矿物定向排列，抗剪强度低，常具有隔水性能。②正断层面粗糙，有时呈锯齿状，抗剪强度较逆断层高，透水排水性能好，常为地下水的通道，在可溶岩地区容易沿其形成岩溶洞穴。③平移断层面平直、光滑，有镜面，产状稳定，倾角一般较陡，延伸长，在平面上常呈X形分布，抗剪强度亦较低。

duanlie lixue

断裂力学

（fracture mechanics）　研究固体中裂纹扩展和传播规律的学科，是力学的一个新分支。裂纹是固体的一种宏观缺陷。断裂力学认为裂纹在一定外力和环境因素的作用下会扩展，从而导致物体的破坏。断裂力学在科学史上第一次把缺陷的尺寸和物体破坏的规律定量地联系起来，这是固体力学的一个突破性进展。

断裂力学的主要内容为：①线性弹性断裂力学。采用弹性力学的线性理论对裂纹体进行力学分析，并采用由此得出的特征参量（应力强度因子、能量释放率）作为判断裂纹扩展的准则。②弹塑性断裂力学。采用弹性力学和塑性力学理论研究变形体中裂纹的扩展规律。③断裂动力学。研究高速加载或裂纹高速扩展条件下的裂纹扩展规律，它需要考虑惯性效应对断裂事件的影响。

断裂力学以连续介质力学理论为基础，把裂纹作为一种边界条件，计算出各种控制断裂事件的参量，如应力强度因子K、裂纹张开位移δ和J积分等，并且由实验测得K、δ和J的临界值K_c、δ_c和J_c，以$K=K_c$、$\delta=\delta_c$和$J=J_c$作为断裂判据，K（δ、J）与外应力σ和裂纹尺寸a有关，K_c（δ_c、J_c）为材料常数。

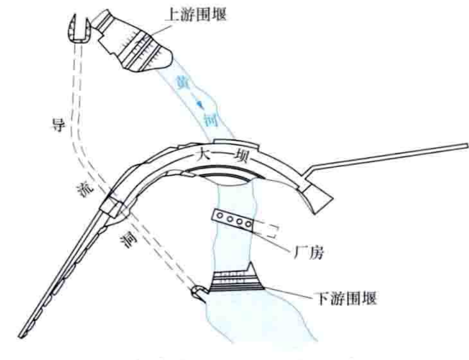
在弹塑性条件下，当应力场强度因子增大到某一临界值时，裂纹便失稳扩展而导致材料断裂，这个临界或失稳扩展的应力场强度因子即为断裂韧度。它反映了材料抵抗裂纹失稳扩展（即抵抗脆断）的能力，是材料的力学性能指标。

连续介质力学的断裂理论从1920年英国人A.A.格里菲思（A.A.Griffith，1893—1963）所做的工作开始萌芽。到1957年美国人G.R.欧文（G.R.Irwin）提出应力强度因子概念，从而建立了线性弹性断裂力学的理论体系。此后发展迅速，已在疲劳、应力腐蚀等问题中得到应用，为工程结构的强度设计和断裂控制提供了理论依据。

duanliu weiyan daoliu

断流围堰导流

（river closure diversion；complete diversion）　在拟建水工建筑物的上、下游河床上各修建一拦断全部河床的围堰，迫使河水经河床外预先建成的隧洞、明渠等导流泄水建筑物下泄的施工导流方式。一般要求导流泄水建筑物先具备运用条件，再进行河床截流、围堰施工，然后排除基坑积水，为主体工程创造出干地施工条件。这种导流方式多适用于窄河床或主体建筑物要求整体平起施工的工程，如土石坝、拱坝等。中国黄河上游龙羊峡水电站为混凝土重力拱坝，坐落于窄深峡谷中，采取断流围堰配合右岸隧洞导流的方式，见图。



龙羊峡水电站施工导流布置图

断流围堰导流方式有基坑全年导流及基坑枯水期导流两种方式。

基坑全年导流　其导流建筑物按全年设计洪水频率的导流流量及相应水位设计。主体工程在围堰的保护下进行全年连续施工，直至建成。对于土坝等不允许施工期间坝体过水的工程，以及拱坝等要求整体平起施工、坝体结构整体挡水的工程，一般均应按基坑全年导流方式设计。基坑全年导流方式有主体工程能够全面施工、施工程序连贯、生产效率高、施工管理方便等优点。但对于大流量的河道，如采用这种导流方式，其导流建筑物，特别是导流泄水建筑物规模较大，导流费用高，导流工程自身的施工工期长，施工难度较大。

基坑枯水期导流　其导流建筑物按枯水时段设计洪水频率的导流流量及相应水位设计。围堰保护主体工程在枯水期内全面施工。这种导流方式的特点是导流工程规模小、费用低等，但主体工程施工条件较差，基坑交通及机械布置等受洪水影响，造成工期紧张，施工强度加大。

枯水期基坑围堰的结构可设计为过水与不过水两种形式。过水见围堰多用于洪水期流量与枯水期流量的比值（洪枯比）悬殊的河道，且主体工程在一个枯水期又不能抢筑出度汛水位的情况。堰体设计为施工期间允许过水而不被破坏的结构。汛后水位下落，围堰能再度挡水，基坑经排水、清污后恢复全面施工。采用不过水围堰，要求主体工程在一个枯水期内

抢修至度汛水位以上，汛期围堰过水被冲毁后，由主体工程挡水，不再依靠围堰，否则只有汛后再重修围堰。

duanmian celiang

断面测量 (section survey) 在选定的两端点之间，对某一方向确定地面起伏变化点、地物的位置和高程进行的测量工作。通常分为纵断面测量、横断面测量。水电工程的断面测量主要包括河道或水库纵横断面测量、坝（厂）址断面测量及其他断面测量。断面测量的平面控制和高程控制的密度和精度要求满足相应比例尺断面测量要求，其平面坐标系统和高程系统应与对应的地形图布置所采用的平面坐标、高程系统一致。

纵断面测量　又称纵剖面测量，用于测量线路中线桩地面高程，具体施测方法与一般水准测量相同。据其成果可绘制纵断面图，供设计坡度用。一般在两个相邻横断面间加测一定密度的地形变换点（河道或水库纵断面为河道深泓点）。因纵断面图的横向比例尺较小，间距可从大于或同比例尺的地形图上量取，河道深度或线路中心点高程可在各自的横断面上获取或实地测量。

纵断面图的内容主要包括图名、水平与竖直比例尺、高程系统、地表线和地表性质、中心桩编号和地面高程、转折点桩号、建筑物的位置和名称等。对于河流纵断面图还应有河流左右岸居民地、厂矿企业名称、两岸地面最高与最低点高程、支流名称及入口位置、河底高程、水文站水尺位置及高程、工作水位和同时水位、横断面位置及编号、河段地形图名称和编号等。

横断面测量　又称横剖面测量，是在线路上所有的整数桩和加桩处测量垂直于线路中线的水平方向上，分别测量中线两侧各变坡点至中线桩的水平距离和高差，并据纵断面成果结合设计纵横断面，以计算挖填的土石方量。应根据设计要求实地选定断面位置，端点用标石或木桩固定，按一定规则或里程编定断面点号。横断面测量可采用全站仪、全球导航卫星系统（GNSS）和其他方法进行。

横断面图的内容主要包括图名、水平与竖直比例尺、高程系统、地表线和地表性质、中心线桩编号和地面高程等。

参考书目

李青岳，陈永奇．工程测量学．北京：测绘出版社，1995．

duishi hunningtu shigong

堆石混凝土施工 (rock filled concrete construction)

采用自密实混凝土填筑自然或人工堆积的堆石体空隙形成建筑物的施工技术。堆石混凝土作为一种新型的大体积混凝土，具有施工工艺简单、水化热低、施工速度快等特点，适用于形状较简单的结构和回填工程。堆石混凝土施工技术自2008年开始应用，主要用于中、小型工程中。

材料特性　堆石混凝土的性能与一般普通混凝土基本相同。在堆石混凝土施工中，对自密实混凝土的工作性能要求较高，要具有良好的流动性、抗离析性、充填性和稳定性。堆石混凝土中所用的自密实混凝土应进行专用外加剂配方设计，确保其能够满足施工要求。堆石混凝土中的堆石应坚硬，体积比例一般可以达到55%～60%，堆石料可以使用毛石、块石和卵石，其粒径不宜小于30cm，最大粒径以运输、入仓方便为限，且堆石料最大粒径不应超过结构断面最小边长的1/4、厚度的1/2。

施工方法　堆石混凝土施工主要包括两道工序，即堆石入仓和自密实混凝土的填筑。两道工序均可以通过大规模的机械化施工来完成。先将满足一定粒径要求的块石（或卵石）自然堆满仓面，堆高不宜大于3m，然后在堆石体表面浇筑满足要求的自密实混凝土，无须振捣，仅依靠其自重充填堆石体的空隙。专用自密实混凝土浇筑与堆石抛填应交替进行。由于水泥用量少、水化热低，温度控制措施较常规混凝土简单。堆石混凝土一般不需要埋设冷却水管，在高温季节施工时，可在料场、仓面采用适当的辅助温控措施，或选在夜间等相对低温时段施工。堆石混凝土的性能指标宜采用大尺寸试验，强度检验与评定宜采用钻孔取芯的方法，检测孔应穿过层间结合带，以反映浇筑层间的密实度情况。

duoxiangliu

多相流 (multiphase flow) 不同相的物质混合在一起的流动。相是指不同物态或同一物态的不同物理性质或力学状态。在能源、水利、化工、冶金等工业部门，以及气象、生物、航天等领域都有多相流动的问题。

多相流常见于各种形态的两相流：①气-液两相流，如泄水建筑物中的掺气水流等；②气-固两相流，如气流输送粉料、含尘埃的大气流动等；③液-固两相流，如天然河道中的含沙水流等。

多相流的发展史可溯源到19世纪70年代，直到20世纪40年代两相流一词始见诸文献；1974年《国际多相流杂志》创刊；1982年多相流手册出版，逐渐形成了一门独立的学科——多相流。

多相流研究途径主要有：

(1) 建立多相流动模型和基本方程组，分析各相的压力、速度、温度、表观密度、体积分数、悬浮物的尺寸及分布等；研究多相流动的压力降、稳定性、临界态及相间相互作用等。20世纪70年代，Drew (1971)、Ishii (1975) 等从基本守恒原理出发，经严格的数学演绎导出了两相流基本方程，但并未被广泛接受。通用的方法是：①双流体模型。对于两相比例相当的情况，分别建立单相各自的数学物理方程，其中考虑了相间的阻力、相对位移、动量和热量的交换（传递）等物理因素。②均质模型。对于两相掺混均匀的流动，可概化为均质（连续介质）模型和扩散模型，沿用经典水力学方法进行分析。③统计群模型。对于颗粒（气泡、液滴和固体颗粒统称为颗粒）群悬浮体两相流，引用随机分析建立统计群（颗粒群）模型。

(2) 凭借物理模型进行实验量测。量测技术至关重要，许多新仪器、新技术在多相流测试中得到应用，如观测流型和流态采用高速摄影、全息照相、流动显示技术，量测速度采用激光流速仪（LDV）、粒子图像测速技术（PIV），检测液流中气泡浓度采用光纤传感器（探针），测气流中固体颗粒浓度采用BP神经网络系统，测断面平均浓度采用放射性同位素法等。中国计量测试学会于1992年10月成立了多相流测试专业委员会，推动了多相流测试技术的发展。

参考书目

刘大有．二相流体动力学．北京：高等教育出版社，1993．



Eluosi shuineng ziyuan

俄罗斯水能资源 （hydropower resources of Russia） 根据英国《国际水电与大坝》杂志 2011 年发布的《World Atlas》统计，俄罗斯水能资源理论蕴藏量为 22 950 亿 kW·h/a，技术可开发量 16 700 亿 kW·h/a，经济可开发量 8520 亿 kW·h/a。2010 年，俄罗斯水电装机容量 46 873MW，年发电量超过 1620 亿 kW·h，约为电力总发电量的 19%，该年发电量占水能资源技术可开发年电量的 11%左右。

俄罗斯地跨欧亚两洲，国土面积 1710 万 km^2，地势东高西低，叶尼塞河以西主要是平原，以东主要是高原、山地。年平均降水量由西部的 750mm 向东、向北逐渐减至 200mm，而东部太平洋沿岸可达 1000mm。俄罗斯水能资源主要分布于其亚洲部分的西伯利亚地区。俄罗斯的经济可开发水能资源中，亚洲部分占 84.6%，主要有叶尼塞河、勒拿河、鄂毕河和黑龙江；欧洲境内部分仅占 15.4%，主要有伏尔加河、第聂伯河和北高加索地区。

俄罗斯水能资源分布与其地区经济发展不相适应，经济发达、人口密集的地区在欧洲部分，而水能资源主要分布在经济不发达的亚洲部分。俄罗斯首先开发欧洲部分第聂伯河和伏尔加河的水能资源，20 世纪 50 年代起向西伯利亚的叶尼塞河及其支流安加拉河发展。

伏尔加河是欧洲第一长河，发源于俄罗斯加里宁州，流域面积 138 万 km^2，河流全长 3688km，河口多年平均流量约 8000m^3/s。伏尔加河可开发水能资源约 12 000MW，已经建成的 11 座水电站总装机容量 11 355MW，多年平均年发电量 399 亿 kW·h，其中伏尔加格勒（2563MW）、古比雪夫（2300MW）水电站规模较大。伏尔加河修建的水利工程多具有航运、发电、渔业养殖等综合利用功能。

第聂伯河是俄罗斯欧洲部分的第二大河，流域面积 50.3 万 km^2，河流全长 2285km，河口多年平均流量约 1670m^3/s。第聂伯河水能资源理论蕴藏量为 146 亿 kW·h/a，规划拟定了 14 座水电梯级，其中上第聂伯河 8 级、下第聂伯河 6 级。1980 年，下第聂伯河的 6 座水电站建成，总装机规模 3836MW，多年平均年发电量 143.9 亿 kW·h。

叶尼塞河是俄罗斯第一大河，流域面积 260.5 万 km^2，河流全长 3481km。全水系水能理论蕴藏量 5877 亿 kW·h/a，可开发水电装机容量 86 791MW，多年平均年发电量 3102 亿 kW·h。干支流已建水电站装机容量 26 770MW，多年平均年发电量 1146 亿 kW·h，其中巨型水电站有萨扬-舒申斯克水电站、克拉斯诺雅尔斯克水电站、布拉茨克水电站、乌斯特-伊里姆水电站、鲍古昌水电站等。叶尼塞河上修建的水电工程多具有发电、航运、灌溉、渔业养殖等综合利用功能。

eding zhuansu

额定转速 （rated speed） 设计选定的机组稳态转速，以 n_N 表示，单位为 r/min。额定转速由水轮机转轮型式、工作水头、流量及效率等因素决定，此外还与发电机的额定电压、并联支路数、合理的槽电流、冷却方式以及结构布置密切相关。

对恒速运行的机组，一般先按水轮机、水泵水轮机或蓄能泵的最优单位转速 n_{110} 计算求得最优转速 n，但计算所得的最优转速一般与同步转速不一致，需经综合分析水轮机、发电机的性能与制造方面等因素后，在与最优转速 n 相邻近的同步转速中选取额定转速 n_N。

机组最优转速计算公式为

$$n=\frac{n_{110}\sqrt{H_w}}{D} \tag{1}$$

发电机同步转速计算公式为

$$n=60f/p \tag{2}$$

式中 p 为发电机磁极对数；f 为电力系统频率。

在频率为 50Hz 的电力系统中，同步转速为

$$n=3000/p \tag{3}$$

中国 50Hz 下常用的机组额定转速值见表。

中国 50Hz 下常用的机组额定转速值 （r/min）

转速	1500	1000	750	600	500	428.6	375	333.3
极数	4	6	8	10	12	14	16	18
转速	300	250	214.3	200	187.5	166.7	150	142.9
极数	20	24	28	30	32	36	40	42
转速	136.4	125	115.4	107.1	100	93.8	88.2	83.3
极数	44	48	52	56	60	64	68	72
转速	75	71.4	68.2	62.5	60			
极数	80	84	88	96	100			

在采用水轮发电电动机变速技术的情况下，水轮机、水泵水轮机或蓄能泵可在给定的调速范围内，以不同的转速运行。

erci jiexian

二次接线 （secondary circuit） 对水电站全厂进行监视控制的自动控制、继电保护、测量、信号等系统设备及其接线（二次回路）中，除自动控制、继电保护成套装置或系统以外的有关设备和接线的总称。其目的是实现电厂运行值班人员对水电站全厂设备的运行、监视、控制和操作，以及保证电站自动控制、继电保护成套装置正常工作。它对水电站的安全运行有着十分重要的作用。

二次接线一般包括：①设备的操作、调整，包括断路器的同期、设备操作安全闭锁系统接线等；②信号系统，包括

开关、设备的状态、故障和事故信号等；③测量系统，包括电测量以及纳入全厂监控系统的非电量的电气测量；④直流控制电源系统，包括直流均充、浮充装置，馈电单元和蓄电池组等；⑤交流回路，包括电流、电压互感器及其二次侧回路接线以及交流控制电源系统；⑥二次接线回路的保护、监视和连接器具；⑦控制电缆；⑧二次接线器具设备的布置等。

随着计算机监控系统在水电站的普遍推广应用，二次接线作为电站监控和操作的基本手段，可与计算机监控系统和继电保护系统的设计原则相结合，完成水电站的运行和监控。

Ertan Shuidianzhan

二滩水电站 （Ertan Hydropower Station） 位于中国四川省米易县和盐边县接壤处，距攀枝花市46km，距成都市727km。电站以发电为主，兼有防洪等综合利用效益，见图1。电站装机容量3300MW，多年平均年发电量170.35亿kW·h，以4回500kV输电线路接入川渝电力系统。

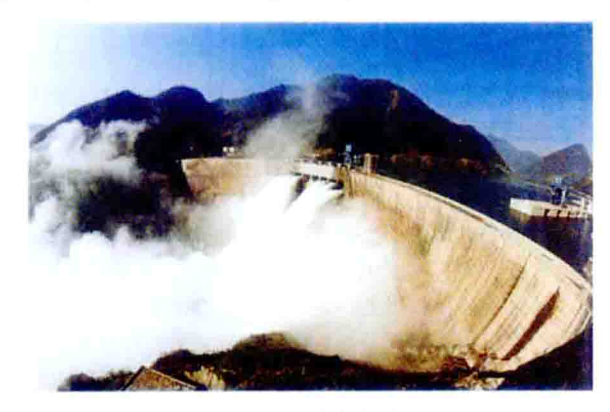


图1 二滩水电站

水文和水库特性 坝址以上流域面积116 400km^2，占全流域的90%。多年平均流量1650m^3/s，多年平均年径流量520亿m^3。1000年一遇设计洪水流量20 600m^3/s，相应库水位1200.00m；5000年一遇校核洪水流量23 900m^3/s，相应库水位1203.50m，总库容61.8亿m^3；正常蓄水位1200.00m，相应库容57.9亿m^3；死水位1155.00m，调节库容33.7亿m^3，属季调节水库。

工程地质条件 坝址由二叠系玄武岩和后期侵入的正长岩组成，岩体坚硬完整。坝址区地震基本烈度Ⅶ度，设计烈度8度。

枢纽布置 枢纽工程由大坝、泄水建筑物和引水发电系统等组成，见图2。

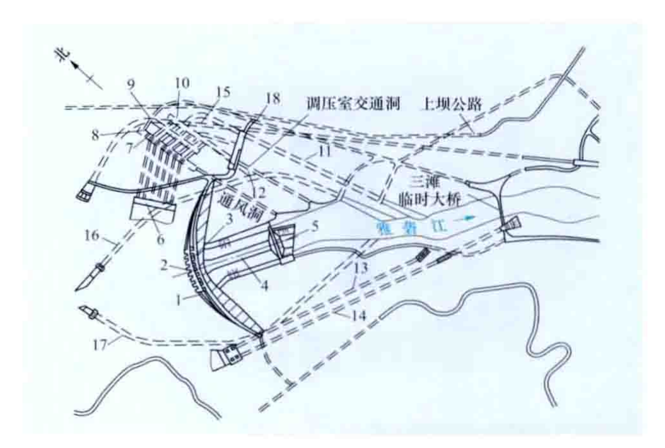


图2 二滩水电站枢纽平面布置图

1—拱坝；2—表孔溢洪道；3—中孔；4—水垫塘；5—二道坝；6—电站进水口；7—厂房；8—安装间；9—主变压器室；10—尾水调压室；11—1号尾水洞；12—2号尾水洞；13—1号泄洪洞；14—2号泄洪洞；15—过木机道；16—左岸导流隧洞；17—右岸导流隧洞；18—500kV开关站

大坝 抛物线形双曲拱坝，坝顶高程1205.00m，坝顶弧长774.7m，坝顶宽11m，最大坝底厚55.7m，厚高比0.232，弧（长）高比3.2，最大中心角91.49°。

泄水建筑物 枢纽共有3套泄洪设施，包括坝上表孔溢流道（泄洪孔7孔，孔口尺寸为11m×11.5m，堰顶高程1188.50m），坝体中孔（6孔，孔口尺寸为6m×5m，出口底高程1120.00～1122.00m）和右岸龙抬头泄洪隧洞（2条，浅水式短进水口，断面尺寸为13m×13.5m，进口底板高程1163.00m）。在正常蓄水位1200.00m时，3套泄流设施能力基本相等，与机组过流相结合，每套泄洪设施均能单独宣泄常年洪水流量，具有互为备用的功能。

消能设计：坝上溢流表孔采用大差动跌坎加分流齿，中孔出水上翘挑射，表、中孔双层多股水舌空中碰撞，并在坝下设置水垫塘消能，塘后设有二道坝。

引水发电系统 位于左岸，包括塔式进水口、6条直径为9m的压力管道及尾水调压室、2条断面尺寸为16.5m×16.5m的尾水隧洞。地下式厂房尺寸280.3m×25.5m×65.7m（长×宽×高）。厂内安装6台单机容量为550MW的混流式水轮发电机组，转轮直径6.3m，水轮机和发电机额定效率分别为94.9%和98.6%。地下主变压器室设6台容量为620MV·A的500kV三相升压变压器。500kV屋外开关站布置在左岸坝肩下游。

工程施工 施工导流采用左、右岸导流隧洞和断流土石围堰的全年导流方式。工程于1991年开工，1993年11月截流，1998年8月第一台机组发电，1999年12月全部机组投产发电。

主要工程量：土石方明挖800.6万m^3，石方洞挖324.3万m^3，混凝土浇筑674.4万m^3，土石方填筑113.2万m^3，帷幕灌浆23.4万m，固结灌浆18万m，钢筋、钢材5.1万t，金属结构安装2.5万t。

设计单位 水利电力部成都勘测设计研究院（现中国水电顾问集团成都勘测设计研究院）。

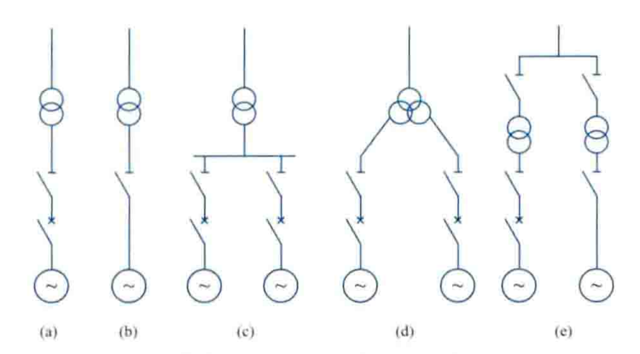
建设单位 二滩水电开发有限责任公司（现雅砻江流域水电开发有限公司）。



fadianji-bianyaqi zuhe jiexian

发电机-变压器组合接线 (generator-transformer block connection) 发电机和变压器之间连接的电路。常用的接线方式有单元接线、扩大单元接线和联合单元接线。

单元接线 一台机组经断路器（或直接）与一台变压器连接成一个单元的接线方式，见图（a）、图（b）。优点是：①接线简单、清晰，运行可靠、灵活，元件故障影响范围小，变压器容量与发电机相同。②发电机电压设备元件少，布置简单方便，维护工作量小。③继电保护简单。缺点是：①变压器和高压断路器数量较扩大单元接线多，增加布置场地和设备投资。②变压器故障时影响一台机组送电。



发电机-变压器组合常用接线简图

（a）、（b）单元接线；（c）、（d）扩大单元接线；（e）联合单元接线

单元接线一般适用于单机容量为200MW及以上机组。当单机容量小于200MW时，如机组台数较少，采用其他接线方式不合适，也可采用。

扩大单元接线 两台及以上机组分别经断路器与一台变压器连接成一个单元的接线方式，见图（c）、图（d）。优点是：①接线简单，运行方便。②变压器台数及相应的高压开关设备比单元接线少，可缩小布置场地和节省投资。③任何一台机组停电，不影响接在变压器低压侧的厂用电源供电。④减少变压器高压侧出线，可简化高压侧接线和设备布置。缺点是：①变压器故障或检修时，两台及以上机组容量不能送出。②发电机电压侧需增加连接母线，布置稍复杂。③增大发电机电压侧短路容量。为限制短路容量，变压器低压侧可采用分裂变压器。

扩大单元接线适用于大、中、小型水电站。在变压器回路故障或检修可能造成大量弃水和影响下游供水时，水电站一般不采用一个扩大单元接线。

联合单元接线 两组及以上单元接线变压器高压侧联合在一起的接线方式，见图（e）。优点是：①变压器台数与机组相同，可节省高压断路器数量，并减少变压器至开关站的进线回路数，有利于进线布置和简化高压侧接线。②与单元接线比较，任何一台机组停机，仍可较方便地由变压器倒送厂用电电源。③与扩大单元接线比较，任何一台变压器故障或检修，接在联合单元的另一台变压器需短时停电，但通过隔离开关切换后即可恢复送电，不致因变压器故障或检修而较长时间地影响本单元全部机组容量送出。缺点是：①变压器高压侧有并联母线和隔离开关，增加了变压器高压侧场地布置面积。并联母线或高压断路器故障，影响本单元全部机组容量送出。②一台机组停机可断开发电机断路器，变压器仍可带电运行，但增加了空载损耗。③任何一台变压器故障或检修，接在本单元的全部机组需短时停机。

联合单元接线适用于机组台数较多的大型水电站。

fadianjiceng

发电机层 (generator floor) 通常为主厂房中最高一层楼层。发电机层的中部为机组，机组周围一般布置有水轮机调速器、压油装置、操作柜等，楼层的上、下游墙侧部位布置有电气表盘以及通往下层的楼梯间。为了下层设备的吊运，楼板上还设有吊物孔。楼板为钢筋混凝土结构，地面要求坚固耐磨、耐腐蚀、清洁美观。

与发电机高度相对应，发电机层楼板有几种布置形式：①发电机定子、转子全部露置于发电机层楼板以上；②发电机的上机架，或只有上机架以上的励磁机、轴承机构部分，露出于发电机层楼板以上，定子、转子都落在楼板下面，发电机的上盖板与楼板齐平，机房显得较宽敞，许多大中型水电站采取这种布置；③发电机全部落在发电机层楼板以下；④没有发电机层，如横轴机组的发电机和水轮机都安装在水轮机层内。

厂房发电机层楼板高程一般与安装间地面高程相同，有利于安装间面积的利用和交通，也有的采用不同高程。

fadianjidianyace jiexian

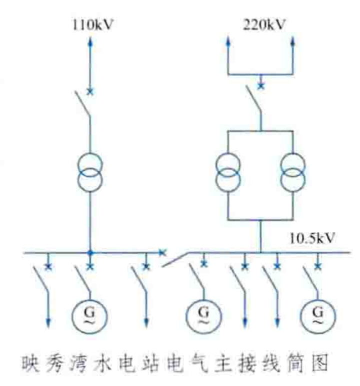
发电机电压侧接线 (electrical connection to generator side) 发电机、发电机电压设备和变压器之间连接的电路。表明发电机、断路器、导体（母线或电缆）、变压器等主要设备的电气连接关系。发电机电压侧有汇流母线时，接线方式有发电机电压单母线接线、发电机电压单母线隔离开关分段接线、发电机电压单母线断路器分段接线。

发电机电压单母线接线 发电机功率的汇集和分配由一条汇流母线来完成。优点是：①接线简单、清晰，运行方便；②配电装置便于扩建；③变压器台数和发电机台数可不一致，一般可采用较少的变压器台数送出全部电能，节省变压器和升高电压侧断路器等设备投资，减少电能损耗和布置场地；④从发电机电压引出直配供电线路较方便；⑤可采用成套配电装置，简化布置。缺点是：①母线或与母线连接的隔离开关故障或检修，需全站停电，可靠性差；②发电机电压设备元件较单元接线多，增加维修工作量。这种接线一般适用于发电机台数不多（如4台以下）、单机容量不大（如15MW以下）的中小型水电站。

发电机电压单母线隔离开关分段接线 用隔离开关将

单母线接线分段。这样，除了分段隔离开关故障或检修需全站停电外，当一段母线及所接隔离开关故障或检修时，只需短时全站停电，将分段隔离开关断开，仍可保持另一段母线所接机组送电。可靠性和灵活性比单母线接线稍高，其他优缺点与单母线接线相同，适用范围也与单母线接线相同。

发电机电压单母线断路器分段接线　用断路器将单母线接线分段。这样，当一段母线及所接隔离开关故障时，分段断路器在继电保护装置的作用下，能自动将故障段母线切除，从而保证了正常段母线不间断供电，在一定程度上克服了单母线接线的缺点，提高了供电可靠性。但是，分段断路器故障时需全站停电，而且当一段母线检修时，该段母线上所有设备都要在检修期间停电。这种接线一般适用于中型水电站，如中国映秀湾水电站（装机容量 3×45MW）即采用此种接线，见图。



映秀湾水电站电气主接线简图

fanlüceng

反滤层　（inverted filter）　防止土体在不同级配土层界面或土层表面的渗流溢出处发生渗透变形，而又能排水的工程设施。有保护无黏性土的和保护黏性土的两类，其作用机理和选择准则均有所不同。组成反滤层的材料可采用均匀料或非均匀级配料，但必须是非管涌土，质地坚硬，渗透系数要大于被保护土层，填筑时应不发生颗粒离析现象。反滤料可采用满足要求的天然砂砾料或人工筛选配制的砂砾料或碎石料。土工合成材料的孔隙大小及渗透性可以人为控制，作为反滤层的应用有很大发展。反滤层与被保护土层之间应满足反滤要求，使被保护土层不致流失，也不致被细粒土淤塞而失效。

保护无黏性土的反滤层　对于不均匀系数 $C_u<(5\sim10)$ 的无黏性土，应满足 $D_{15}/d_{85}\leqslant(4\sim5)$ 和 $D_{15}/d_{15}\geqslant5$ 的要求。D 和 d 分别表示反滤层和被保护土层的特征粒径，下角标表示小于该粒径的土重百分数。对于 $C_u>10$ 的不均匀土，应保护其细料部分，d 应指细料部分的特征粒径。对于连续级配的被保护土，可取 $C_u\leqslant(5\sim10)$ 的细粒部分；对于不连续级配的土，应取级配曲线平段以下的细粒部分。根据选定的反滤层特征粒径及允许的不均匀系数，得到设计的颗粒级配曲线。不能用上述方法选定反滤料时，或对于重要工程，则通过试验论证选定。

保护黏性土的反滤层　应从防渗体开裂时可防止其土粒流失，有利于促进裂缝自愈的角度来选择反滤料，一般通过试验确定。试验研究表明，$D_{15}\leqslant(0.5\sim2.0)$ mm 的砂砾料可保护黏性土，其大值适用于有稳固团粒结构的黏土，小值适用于分散性黏土，一般沉积黏性土可取中间值。

反滤层厚度和层数　反滤层厚度理论上只要达到最大粒径的 5 倍即可满足要求，但实际上主要受施工条件控制。反滤层层数不应超过 3 层，后一层反滤层以前一层反滤层为被保护层选定其级配。根据土层过渡情况和机械化施工条件，人们倾向于增加层厚和减少层数。

fang feiyi cuoshi

防飞逸措施　（protection measure against runaway）　为防止水轮发电机组转速过度升高而采取的措施。机组甩负荷时，若调速系统同时发生故障而使导叶不能及时关闭，机组转速将会过度升高，甚至达到水轮机飞逸转速。飞逸转速下强大的离心力可能损坏机组转动部件或轴系系统，或引起机组与厂房的强烈振动，尤其是大容量、高转速机组，应避免飞逸转速的发生。防飞逸措施主要有两种：①在压力钢管的进水口设快速闸门或在蜗壳前设进水阀，也有一些大型混流式水轮机装设圆筒阀作为机组防飞逸措施。当机组事故甩负荷且调速系统故障时，关闭快速闸门、进水阀或水轮机圆筒阀。②增设过速限制器（习惯上称事故配压阀）。过速限制器的工作原理是，当机组转速升高至某一预先设定值而调速系统故障使导叶不能关闭时，自动切断调速系统主配压阀与导叶接力器间的油路，直接将压力油引入导叶接力器的关闭腔，使导叶关闭。过速限制器的油源可以引自相邻机组的油压装置或设置专用的事故油压装置。过速限制器还应有可靠的备用压力油源。低水头水电站一般仅设置过速限制器作为机组防飞逸措施。

fanghong diaodu

防洪调度　（regulation of flood control）　见洪水调节。

fanghong gaoshuiwei

防洪高水位　（upper water level for flood control）

当水库遇到下游防洪保护对象的设计标准洪水时在坝前达到的最高水位。防洪高水位是水库进行防洪调度的重要标志，据以区别调节洪水的目标。汛期当库水位处于防洪限制水位和防洪高水位之间时，水库按下游防护对象要求控泄出库流量，保证下游河道流量不超过防洪允许的安全泄量。当库水位达到或高于防洪高水位且入库流量仍继续上涨时，水库不再以下游安全泄量为约束，加大出库流量以保证大坝安全（见校核洪水位）。防洪限制水位与防洪高水位之间的库容为防洪库容。

防洪高水位是在设计阶段选定。防洪高水位的选择是有防洪任务水电站设计的重要内容。选择时要进行的工作包括：①分析洪水特性，选择若干有代表性的设计洪水过程线，包括电站入库洪水过程及坝址到下游防护区的区间洪水过程。②分析防护区河道泄洪条件、建设堤防或蓄洪区条件等，拟定若干防洪标准和河道安全泄量方案。③研究水库设置防洪库容的条件，如坝体工程量、泄水建筑物工程量和水库淹没损失等，拟定若干防洪库容方案。④据以上研究分析得到的数据经过方案比较统一选择出防洪高水位、防洪限制水位、堤防或分蓄洪区设施规模、防洪标准和安全泄量。因为防洪高水位与上述其他特征值互相影响，在中国一般采用分层次选择的方法，如先选定防洪标准，再选定堤防等其他防洪设施规模及河道安全泄量，最后以防洪限制水位为起调水位，通过调洪计算选定防洪高水位。也有把上述各项参数

组成大量的组合方案，从中同时优化选定。

fanghong kanghan xiaoyi

防洪抗旱效益 (benefits of flood control and drought relief) 具有综合利用效益的水电站水库依据自身调节性能，调蓄河川径流，提高下游地区的防洪标准和供水、灌溉保证率所产生的效益。

基本原理 水电站按防汛抗旱调度运行要求，汛期按防洪水位运行，一般降低水位至防洪限制水位，以预留防洪库容（见防洪高水位）。遇到洪水，水库蓄洪，减少下泄流量；洪峰过后，将所蓄洪水逐渐下泄。枯水期或旱季水电站加大下泄流量，使下游河道流量和水质的季节性变化减小，可以保证下游取水口运行的均衡稳定，提高下游城镇供水保证率，改善当地居民的生产生活环境。同时，枯水期或旱季河道径流的增加，可提高农业灌溉用水保证率，增加农业灌溉面积，提高农作物产量。

水电站水库的调节可以起到削峰、错峰和抗旱作用。尤其是梯级水库联合调节，比单个水库更有利于提高抵御洪灾和旱灾的标准，降低灾害的影响程度。

削峰 通过水库的调蓄作用，使水库下泄流量小于上游最大入库洪峰流量，以减小洪水对下游的影响程度。

错峰 通过水库的调蓄作用，使两个以上不同水源地的洪峰相遇的时间错开，相机下泄，错开洪峰，减小下游洪水的影响程度。

抗旱 通过电站调节增大枯水期或旱季流量，使下游河道流量和水质的季节性变化减小，可以保证下游取水口运行期的均衡稳定，提高下游城镇供水保证率，改善当地居民的生产生活环境；同时，枯水期或旱季河道径流的增加，可提高农业灌溉用水保证率，增加农业灌溉面积，提高农作物产量。

工程实践 中国降水和暴雨集中，大江大河洪涝灾害严重。具有综合利用效益的大中型水电站一般兼有抵御自然水文灾害的功能，基本都设计有防洪库容，其在防洪中可发挥重要作用。如1998年和2010年夏季，长江等多个流域发生了特大洪水，通过电站水库的拦洪、削峰、错峰，避免了各路洪水相遇，带来了巨大的防洪效益。

通过水电站调节增大枯水期或旱季流量，极大地提高水资源的利用程度。小浪底电站运行后，平均每年可增加20亿m^3的调节水量，满足下游灌溉与城市用水需求，提高了供水保证率，减小了下游断流几率；刘家峡水库自1969年蓄水运用后，每年预留8亿～12亿m^3的水量为宁夏、内蒙古补水，使宁蒙灌区用水保证率由天然的65%提高到100%；2011年，长江中下游地区发生大面积的持续干旱，三峡水库通过科学调度，为下游补充水量200亿m^3，减轻了旱灾损失。

参考书目

方子云．水利建设的环境效应分析与量化．北京：中国环境科学出版社，1993.

陆孝平，谭培伦，王淑筠．水利工程防洪经济效益分析方法与实践．南京：河海大学出版社，1993.

fanghong kurong

防洪库容 (flood control storage capacity) 见防洪高水位。

fanghong xianzhi shuiwei

防洪限制水位 (flood control level) 为承担下游防洪任务，水库在汛期允许兴利蓄水的上限水位。又称汛期限制水位。当汛期不同时段的洪水特性有明显差别时，可考虑分期设置不同的防洪限制水位。

防洪限制水位低于正常蓄水位。水电站正常运行时，汛期库水位不得超过防洪限制水位，仅当入库洪水超过设计标准时，才允许超过防洪限制水位，而按洪水调度规则调度。

洪水在汛期各时段（月或旬）的大小是不同的，因此水库防洪限制水位在汛期各时段（月或旬）也可以不同。主汛期洪水较大，需要较大的防洪库容，防洪限制水位较低，次汛期入库洪水逐渐减小，防洪限制水位可相应抬高，汛期过后可提高到正常蓄水位。

从防洪限制水位至防洪高水位之间的库容为防洪库容（见防洪高水位）。防洪限制水位至正常蓄水位之间的库容为水资源利用和调洪共用的库容。共用库容的设置，可以降低防洪最高水位，相应降低坝高，减少建设费用，但也相应增加了汛后蓄不到正常蓄水位，从而减少发电和综合利用效益的风险。因此，共用库容要根据河流洪水特性，经过分期洪水分析计算和调洪计算，进行技术经济比较确定。

fangshenqiang shigong

防渗墙施工 (cut-off wall construction) 在水工建筑物松散透水地基中或土石坝体内造孔，采用泥浆固壁，回填混凝土或其他防渗材料，筑成具有防渗功能的地下连续墙的工程技术，见图。混凝土防渗墙厚度一般为30～120cm，主要用于水工建筑物地基或坝体防渗、加固、防冲等，主要优点是防渗性能好、安全、耐久、可靠。



防渗墙施工

墙体材料 主要分为刚性材料和柔性材料，应根据地质条件、墙的受力状况，以及设计对防渗墙性能的要求而选定。前者主要有普通混凝土、黏土混凝土等，后者主要有塑性混凝土、固化灰浆、自凝灰浆等。塑性混凝土一般指低弹性模量（1000MPa以下）、低强度（28天抗压强度小于5MPa）性能的混凝土。

造孔 土石坝地基和围堰工程所用的防渗墙深度一般较大，常用的造孔机械有冲击钻、冲击反循环钻、抓斗挖槽机、双轮铣钻机等，有时将多种设备联合运用。造孔过程中如遇到直径大的漂石、孤石和块球体，则需采用孔内爆破和辅以10t左右的重锤击碎的方式解决。采用冲击钻造孔时，

为防止塌孔，需分序造孔，每段长度一般为4～8m，并采用泥浆固壁。

江河堤防有时也采用防渗墙，其厚度一般小于40cm，深度也浅，常用的施工机械有射水法造墙机、液压开槽机、锯槽机和斗宽为30cm的薄型抓斗等。

浇筑　造孔完毕并进行清渣后即开始进行混凝土浇筑。墙体混凝土一般用导管法浇筑，导管内径为200～250mm，开浇时导管底口距孔底控制在15～25cm范围内，然后边浇边提升，自下而上置换孔内泥浆，直至墙体设计高程。当墙体内设置钢筋时，应在浇筑混凝土前将预制好的钢筋笼放置在槽孔内并固定好，然后开浇混凝土。防渗墙施工的关键要保证槽形孔或连锁桩柱孔的连续性和完整性，使用套管接头的形式可解决墙体接头处夹泥、夹砂的问题。

质量控制　分工序质量控制和墙体质量控制，注重施工过程的检查和控制。工序质量检查包括终孔（孔位、孔深、孔斜、槽宽、嵌入基岩深度等）、清孔、接头管吊放、钢筋笼制造及吊放、混凝土拌制与浇筑等检查。墙体质量检查应在成墙后28天进行，检查内容包括墙体的物理力学性能指标、墙段接缝和可能存在的缺陷，检查方法一般采用钻孔取芯、注水试验等。为了解墙体运行情况，墙内可埋设仪器进行原型观测。

发展概况　地下连续墙技术首创于20世纪50年代初，起源于欧洲。50年代末开始在中国水利水电工程中使用。90年代中期以后，世界上先进的防渗墙技术在中国的多个水利水电工程中使用。中国小浪底水利枢纽主坝混凝土防渗墙的最大造孔深度为81.90m，成墙采用“两钻一抓”（钻机和抓斗联合）成槽法，墙体厚度0.8m。长江三峡水利枢纽二期围堰防渗墙工程深槽段最深槽孔槽深73.6m，一、二期围堰防渗墙总面积达13.15万m^2，除采用“两钻一抓”成槽法外，还采用双轮铣钻机成槽的方法。中国新疆下坂地水利工程坝基防渗采用上部混凝土防渗墙、下接帷幕灌浆的方案，防渗墙最大槽孔深度90m，成墙施工设备采用冲击反循环钻机、抓斗和冲击钻机。

fangshen weimu

防渗帷幕　(seepage proof curtain)　采用钻孔灌浆形成截断地下渗流通道的连续幕体，是常用的坝基防渗措施之一。帷幕的主要作用有：①减少坝基和绕坝渗漏量；②防止断层、裂隙中的充填物及抗水性能差的岩层产生管涌；③与排水共同作用下，使幕后坝基及两岸边坡的渗透压力降低至允许值，防止渗透压力对坝体、坝基及两岸边坡稳定产生不利影响；④兼有对坝基表层的接触灌浆和固结灌浆的作用。

分类　用钻孔灌入水泥（包括超细水泥）浆形成帷幕称水泥灌浆帷幕（见帷幕灌浆），灌浆材料为聚氨酯、环氧树脂、丙烯酸盐、水玻璃等称化学灌浆帷幕。在可灌的深厚砂砾石坝基中，通过钻孔向砂砾石层中灌注水泥浆、水泥黏土浆或水玻璃等胶凝材料固化后也可形成防渗帷幕（见软基处理）。

帷幕范围　帷幕范围应根据地质条件及防渗要求，经计算或试验确定。伸入两岸的范围由坝高、地质条件及防渗要求等确定，一般至正常蓄水位与天然地下水位相接处。帷幕深度一般伸入相对隔水层以下3～5m；相对隔水层埋藏较深或分布无规律性时，帷幕深度通常在0.3～0.7倍水头范围内选择。相对隔水层考虑坝高、坝型、地质条件等因素，以钻孔压水试验透水率$q<1\sim10$Lu（吕荣）为标准。不同坝高的混凝土坝采用：坝高100m以上为1～3Lu；100～50m为3～5Lu；50m以下为5Lu。不同级别的土石坝采用：1、2级坝及高坝为3～5Lu；3级坝及以下为5～10Lu。岩溶地区的帷幕深度及伸入两岸的范围，应根据岩溶及渗漏通道的分布情况和防渗要求确定。伸入相对隔水层的帷幕称封闭式帷幕，未伸入相对隔水层的帷幕称悬挂式帷幕。

帷幕钻孔布置　帷幕灌浆的钻孔方向有垂直和倾斜两种，帷幕钻孔的排数有单排和多排之分。倾斜帷幕在一定地质条件下，能穿过较多的岩体裂隙和层面，有时比垂直帷幕的防渗效果好，但对钻孔施工要求较高。单排孔帷幕适用于岩体完整性良好、透水性弱的坝基；当帷幕承受水头较高或裂隙发育、岩体透水性强或砂砾石地基时，可采用多排帷幕。帷幕孔距可为1.5～3m，排距宜比孔距略小。

当水头较高时，为保证帷幕质量和方便施工，两岸帷幕沿坝基按30～50m高差分层布置和施工，上、下层帷幕搭接处采取浅孔灌浆等措施，保证其可靠衔接。

fang taiji cuoshi

防抬机措施　(protection measure against upward thrust)　为防止反水锤、反向水推力可能导致的水轮发电机组转动部分上抬造成有关部件损坏（习惯上称为抬机事故）而采取的措施。轴流式水轮机在甩负荷过程中，导叶关闭速度过快，导致水流中断，产生反水锤，进而引发抬机事故。另一种情况是，在机组甩负荷过程中或机组带水作调相运行时，机组进入水泵工作状态，产生反向水推力，引发抬机事故。常采用机械限位、设置补气阀和导叶分段关闭等措施防止抬机。一般情况下，3种措施同时使用：①机械限位用来限制任何原因引起的水轮机转动部分的向上移动。②补气阀用来防止当导叶迅速关闭，水流中断时由于水流惯性在转轮室形成真空而导致的反水锤。补气阀要求动作灵敏，并有足够大的补气量。③导叶分段关闭的目的是在满足调节保证要求的前提下延长导叶的总关闭时间，以减弱反水锤及其向上力。此外，有时还用调相补气阀在机组甩负荷时进行补气的办法来防止抬机。对转桨式水轮机，还可以在导叶迅速关闭的同时打开桨叶，破坏协联关系来防止抬机。

feiyi zhuansu

飞逸转速　(runaway speed)　对水轮机，飞逸转速指其处于失控状态，轴端负荷力矩为零时的最高稳态转速，以n_{run}表示。对蓄能泵（水泵水轮机的泵工况，下同），飞逸转速指电动机断电，其处于失控状态，以水轮机方向旋转的最高稳态转速，以$n_{p.run}$表示，单位为r/min。飞逸转速是发电机或电动机结构强度计算的重要依据。

原型水轮机飞逸转速计算公式为

$$n_{run}=\frac{n_{run.11}\sqrt{H}}{D} \tag{1}$$

式中$n_{run.11}$为单位飞逸转速；H为水头，m；D为水轮机转轮公称直径，m。

原型蓄能泵飞逸转速计算公式为

$$n_{p.run}=\frac{n_{p.run.11}\sqrt{H}}{D} \quad (2)$$

式中 $n_{p.run.11}$ 为单位飞逸转速；H 为蓄能泵反向飞逸时的水头，m；D 为蓄能泵叶轮公称直径，m。

飞逸转速与水轮机的工作水头和导叶开度（冲击式为针阀开度 s_0）有关，一般在最大水头和最大开度时达到飞逸转速。轴流转桨式水轮机的飞逸转速还和桨叶转角 φ 和导叶开度 a_0 有关，通常飞逸转速出现在协联关系破坏时。

feidianqiliang celiang

非电气量测量

(measurement of non-electrical parameters) 水电站各类非电气运行参数的测量。非电气量是指温度、压力、差压、液位（水位和油位）、水头、液流、流量、转速、开度等，供监视、控制、调节、制表记录、安全保护、数据传输之用。非电气量的测量，一般通过传感器（或称变换器）把被测量的非电气量转换成模拟量或数字量。

温度测量 水轮发电机组需要测量温度的部位有推力轴承、导轴承，定子铁芯和绕组，发电机冷却器进、出口空气，变压器油，空气压缩机轴承，调速器回油箱等。温度检测元件选用 Pt100 的铂热电阻。温度测量的方法有：①采用温度巡检装置对各测温点的温度进行巡回检测，当出现温度超过设定值时，发出报警信号；②直接将各测温点接入监控系统可编程控制器中的测温模块，在线检测各点的温度，在排除断线和阶跃故障的情况下，对超过设定限值的温度点给予报警。此外，有选择地设置温度信号计，在显示的同时，对温度高和温度过高的测温点，发出报警和跳闸信号。

主变压器、空气压缩机等处的测温点很少，一般可单独装设温度信号计。

压力测量 水电站需要测量压力的部位有调速器的油压装置，快速闸门、阀门控制用的油压或水压装置，断路器液压机构，高、低压压缩空气系统，水轮机轴密封润滑系统、蜗壳和尾水管，机组冷却水系统、机械制动系统等处。测量压力的方法有：①带触点的压力表。有标度指示并能发信号的仪表。②压力信号计。没有标度，利用弹簧管的变形带动杠杆系统，推动水银开关发出相应信号。③压力变送器。其中一种是当测压元件在压力作用下产生位移，输出相应的信号，需与自动电位差计及毫伏变送器二次仪表配套使用；另一种是将压力转换为电量的压力变送器。④波纹管式压力计。存在压力时，波纹管产生位移而显示压力。

差压测量 水电站许多部位需要测量差压，如拦污栅堵塞可直接反映至栅前和栅后的差压而发出信号，供水管道上可利用测量差压来表示水流流通，当水流堵断、差压为零，发出信号。有时也利用差压原理构成钢管爆破保护。测量差压的装置有：①双波纹管差压计。存在差压时，波纹管受力位移，变成相应的扭角使显示仪表显示差压。②膜片（或称膜盒）式差压计。利用膜片作测压元件，存在差压时，膜片发生位移而产生输出，与其他仪表配套可分别进行指示、记录或报警。

液位、水头测量 水电站水库水位、尾水水位、集水井水位、调相时测量转轮下部水位、水轮发电机组轴承油槽油位、调速器以及闸门、阀门控制用的压油槽、回油箱、漏油箱等处的油位均需装设液位测量装置。液位测量有些供指示用，大多数参与自动控制、发报警信号，也有两者兼用的。测量水库水位和尾水水位，多采用码盘传感器和/或投入式压力传感器。

用于自动控制和报警的液位信号器有：①磁钢浮子式液位信号器。由浮子、导管、湿（或干）簧触点等组成，液面的变化，使带有永久磁钢的浮子相应变化，至预定的位置时，湿簧或干簧触点动作、发出信号。②压力式液位计。按受压力的大小确定是否发信号。③灯泡浮子型液位信号器。每个浮子内装有一个水银开关，随着液位的变化，浮子按预先整定的位置翻转，使水银开关动作，发出信号。④电极式水位信号器。利用电极测量不同水位，水位上升使某一电极浸水，此电极与已浸入水中的电极构成电通路而发出信号。

液流监测 需要监测液流的部位有水轮发电机水冷却器出口、轴承水冷却器出口、变压器循环油系统。监测液流的装置有：①差压计。利用有液流通过管道孔板时孔板两侧存在差压、液流中断时平压的原理对液流进行监视。②挡板式示流信号器。利用液流冲动挡板翻转，使之与其连动的永久磁钢接近湿簧触点而动作，液流中断，湿簧触点释放而发信号。③磁钢浮筒式示流信号器。当有液流时，借流速将浮筒及永久磁环推动上移至预定位置时，使湿簧触点断开，当液流中断，浮筒与磁环下落，湿簧触点接通发出信号。④靶式示流信号器。当通液流时，靶及靶杆受力带动微动开关使其触点断开，断流时，微动开关复原，接通触点、发出信号。

流量测量 长期以来一直利用膜盒式差压计测量水轮机流量，但精度与可靠性均达不到应有的要求，因此采用利用水的声学特性来测量流量的超声波流量计。因为水的流速变化会引起声速的变化，利用顺水流与逆水流的频率差，直接测量水流流量。

转速测量 转速检测用于机组过速保护、自动投切同步装置、投电气或机械制动系统等。转速测量由专用的转速信号装置完成，转速测量信号源采用机端电压互感器和/或主轴齿盘传感器，信号源不少于两个。特殊地，机组过速保护需要装设机械和电气两种信号源的转速信号器。

闸门开度荷载测量 采用闸门开度传感器，传感器选用绝对值型旋转编码器，配置相应的开度显示装置。荷载采用闸门荷重传感器，荷重传感器的数量根据闸门的吊点数量配置。

Fei Zhou shuineng ziyuan

非洲水能资源

(hydropower resources of Africa)

根据英国《国际水电与大坝》杂志 2011 年发布的《World Atlas》统计，非洲水能资源理论蕴藏量超过 25 065 亿kW·h/a，技术可开发量超过 11 838 亿 kW·h/a，经济可开发量超过 7792 亿 kW·h/a。

非洲（包括附近岛屿）的面积约 3020 万 km^2，为高原型大陆，平均海拔 750m。非洲的气候特点是大部分地区高温、干燥、少雨，降水量一般从赤道向南北侧减少。全洲 1/3 的地区降水量不足 200mm，只有刚果盆地和几内亚湾沿岸一带及山地的向风坡年降水量在 300～1000mm 之间。非洲大陆内流河的流域面积占全洲面积的 31%，内流区基

本没有水能资源。外流区的河流大部分属于大西洋水系，如扎伊尔河、尼日尔河、沃尔特河等。尼罗河流入地中海，赞比西河流入印度洋。

由于地形和降水等因素，非洲水能资源分布不均，位于中非大西洋沿岸的刚果、喀麦隆、安哥拉、加蓬以及印度洋沿岸的埃塞俄比亚等国水能资源较丰富。刚果国土面积仅占非洲的 7.8% 左右，而其技术可开发水能资源占全洲的 46%。

扎伊尔河又称刚果河，发源于赞比亚北部高原，流域面积约 370 万 km^2，全长 4640km，流经赞比亚、安哥拉、刚果（金）等国，注入大西洋，河口年平均流量 39 000m^3/s，其流域面积和流量均居非洲首位。全流域可开发装机规模 1.56 亿 kW，多年平均年发电量 9640 亿 kW·h。刚果河水能资源主要集中在上游和下游，上游段的基桑加尼瀑布水能资源蕴藏量为 1200～2200MW，下游段的金沙萨至马塔迪之间 200 多公里河段上落差为 280m，是非洲水能资源最集中的河段，规划分皮奥卡、大英加、马塔迪 3 级开发，总装机规模 73 000MW，其中大英加装机容量 39 000MW，尚未建设。

尼罗河是世界最长的河流，流域面积约 287 万 km^2，占非洲大陆面积的 1/9 以上。全长 6670km，流经乌干达、肯尼亚、埃塞俄比亚、苏丹、埃及等国，注入地中海，入口处平均流量 2570m^3/s。尼罗河干支流已开发 10 座水电站，总装机容量 3690MW，最大的是阿斯旺水电站，装机容量 2100MW。

尼日尔河流域面积 210 万 km^2，全长 4160km，流经几内亚、马里、尼日尔、尼日利亚等国，注入大西洋，入口平均流量 6300m^3/s。尼日利亚境内建设有 3 座水电站，装机规模 2120MW。几内亚、马里和尼日尔境内还有一些瀑布，是适宜建水电站的地址。

赞比西河是南部非洲最大的河流，流域面积 135 万 km^2，全长 2660km，干流流经安哥拉、纳米比亚、赞比亚等国，注入印度洋，入口处年平均流量 7080m^3/s。规划在干、支流建 9 座水电站，总装机规模 13 880MW，已建成 4 座，装机规模 3920MW。其中卡博拉巴萨水电站装机容量 4150MW，多年平均年发电量 205 亿 kW·h，1988 年全部投产发电。

非洲已、在建水电装机容量 28 704MW，开发程度仅为 8%左右，是各大洲最低的，开发潜力较大。已开发水电站主要分布在埃及、加纳、尼日利亚、赞比亚、刚果（金）等国。

fei-wushui chuli

废污水处理 (wastewater and sewage treatment)

采用物理、化学、物理化学以及生物处理方法将水电站工程建设及运行过程中产生的废污水进行处理，降低污染物的浓度，以达到再生利用或达标排放的水环境保护措施。

水电站废污水构成 水电站产生的废污水按时段分为施工期废污水和运行期废污水，按其来源和性质分为生产废水和生活污水两大类。施工期生产废水主要来自砂石料加工系统废水、混凝土拌和系统废水、机修废水等，生活污水主要来自工程建设管理人员和施工人员日常生活用水。运行期生产废水主要来自发电厂内部分操作阀件在检修和清洗时的含油废水，生活污水主要来自电站运行管理人员日常生活用水。

废污水排放要求 按水电站所在地水环境功能区划和环境保护行政主管部门确认的废污水回用标准或排放标准，处理后的废污水的回用或达标排放。

水电工程废污水处理方法 废污水处理按净化程度分为一级处理、二级处理、三级处理。水电站废污水处理主要采用一级处理或二级处理，一级处理方法主要有自然沉淀、混凝沉淀、机械处理，二级处理方法是在一级处理的基础上增加生物处理。

自然沉淀　不用药剂，在池中自然沉淀。

混凝沉淀　向废污水中投加混凝剂或助凝剂，在沉淀池中进行沉降分离处理。

机械处理　向废污水中投加混凝剂或助凝剂，利用机械离心分离设备进行沉降分离处理。

生物处理　利用微生物对生活污水中的有机物进行分解和降解。

（1）砂石料加工系统废水不含有毒有害物质，主要污染物为高浓度悬浮物，主要处理方法有自然沉淀、混凝沉淀以及机械处理。

（2）混凝土拌和系统废水不含有毒有害物质，主要污染物为悬浮物和 pH 值，主要处理方法有自然沉淀、混凝沉淀以及机械处理。

（3）机修废水主要污染物为石油类物质，主要处理方法有机械处理。

（4）生活污水不含有毒有害物质，主要污染物与城镇生活污水水质特点相似，主要处理方法有自然沉淀＋生物处理。

水电站废污水处理典型工艺流程见图 1 和图 2。

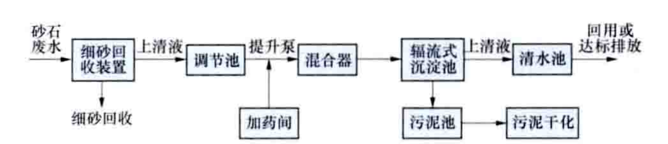


图 1　水电站砂石废水辐流式沉淀池处理工艺流程（混凝沉淀）

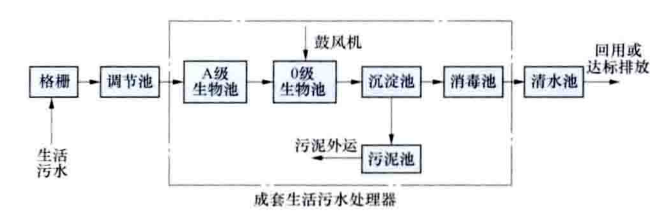


图 2　水电站生活污水处理工艺流程（生物处理）

参考书目

彭党聪. 水污染控制工程. 3 版. 北京：冶金工业出版社，2010.

feiyong biaozhun (shuidian)

费用标准（水电） (expense standard of hydropower project)

根据国家有关政策、统计或市场资料分析确定的，由行业主管部门编制并发布的用于计算工程基础价格、工程单价、枢纽工程投资、建设征地移民安置补偿费用、独立费用、基本预备费、价差预备费，以及建设期利息

等建设投资或费用的费率或额度。

fenceng qushui

分层取水 (selective withdrawal) 减缓下泄低温水对水温敏感目标造成显著影响时，设置多层取水进水口，调控下泄水温的一种措施。

影响水库水温的主要因素主要是太阳辐射热、水库形态和规模、入库水量和水温、取水口位置及水库调度运行。受这些因素的影响，水库水温的垂向分布可分为混合型、过渡型和分层型。受入流水温和气象条件周期性变化的影响，水库水温也呈周期性变化。水库下泄水温与电站取水口位置有关，取水口位置高，泄放水库中上层温度较高的水体；取水口位置低，特别是深水孔，泄放库内深层冷水。

为减缓低温水对水温敏感目标的影响，根据水库垂向分层型态和水温变化规律，通过控制不同高程的取水口来调控水温。

水电站工程多采用叠梁门分层取水形式来调控水温，减缓下泄低温水的不利影响。

fencengqushui jinshuikou

分层取水进水口 (multi-level selective withdrawal intake) 针对水温分层型水库，为获取水库不同高程水体以达到控制下泄水温目的而设置的取水建筑物。高坝大库由于水体在水库内滞留时间长，在重力和热力等联合作用下，水库垂向水温分布通常会呈现分层现象，夏季一般表面水温较高、底部水温较低，当进水口取水高程较低时，取自水库底层的水体温度较天然河道低，会对下游水生生物和农业灌溉等生态造成一定的不利影响，通常多采用设置分层取水进水口的措施，根据需要从相应水层取水，从而达到控制下泄水温的目的。

分层取水进水口形式多样，大中型水电工程多采用叠梁门形式和多层取水口形式，此外还有水力控制的浮式板型、浮式管型、多层水力自动翻板型和机械控制的塔（井）式、斜卧式、圆筒式等。

叠梁门形式 通过叠梁门的增减控制取水高程，闸门控制简单，如图1所示。中国已建成的采用分层取水进水口的水电站有滩坑、光照等，正在建设的水电站有糯扎渡、锦屏一级、溪洛渡等。

多层取水口形式 根据需求在不同高程分别设置取水口，各层取水口通过独立的闸门控制，实现分层取水。各层取水口之间一般采用竖（斜）井连通，如图2所示。

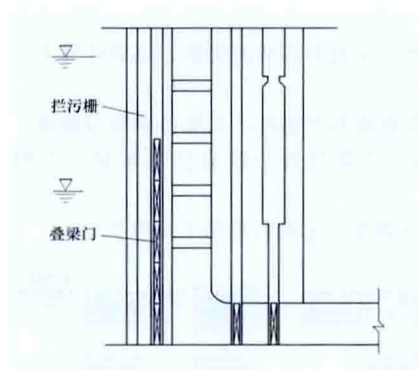


图1 分层取水进水口（叠梁门形式）



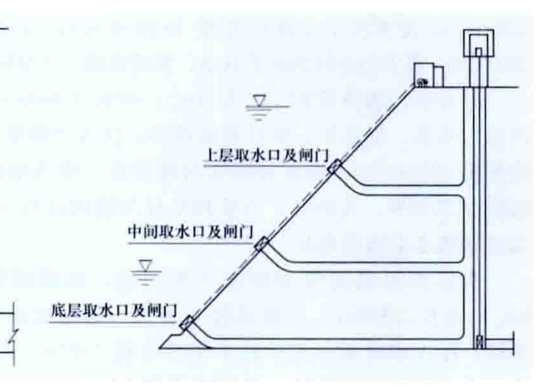


图2 分层取水进水口（多层取水口形式）

fenqi sheji hongshui

分期设计洪水 (stage design flood) 符合水利水电工程设计、施工、运行需要的年内各分时段的设计洪水。根据设计需要，也可分为汛期分期设计洪水、非汛期设计洪水和施工分期设计洪水。汛期分期设计洪水是为合理确定汛期限制水位，进行科学的防洪调度，缓减防洪与兴利的矛盾计算的主汛期或前汛期、后汛期等不同时期的设计洪水。非汛期设计洪水是为计算非汛期回水及水库淹没范围的设计洪水。施工分期设计洪水是为工程施工期间推求的设计洪水，作为围堰、导流、泄洪等临时性工程的设计，以及制订施工进度计划的依据。分期设计洪水的主要计算内容包括分期及选样、频率计算和合理性检查。

分期及选样 汛期分期的划分，既要考虑工程设计中不同季节对防洪安全和分期蓄水的要求，又要使分期基本符合暴雨和洪水的季节性变化及成因特点。非汛期设计洪水应以非汛期每年一个最大流量组成系列。对于施工分期设计洪水，分期的划分应根据洪水在年内的变化规律和成因特点，并考虑施工设计要求，将一年内分为若干个分期，分期不宜短于一个月。分期设计洪水选样，一般是在规定时段内按年最大值法选择，选样方法有不跨期和跨期两种。不跨期选样时，若一次洪水过程位于两个分期，则视其洪峰或时段洪量主要位于何期，即作为该期的样本而不作重复选样。跨期选样时，跨期的幅度一般不超过5～10天。

频率计算 本质上与年最大洪水的频率分析计算一样。实际计算时应注意：①历史洪水按其发生时间所在分期（含跨期）采用，其重现期在该分期内确定，但不得短于其在年最大洪水中的重现期。②施工洪水的洪水标准较低，当具有较长资料系列时，也有直接采用经验频率值的。③上游有调蓄水库时，需分析计算受其调蓄影响后的分期设计洪水。

合理性检查 由于分期设计洪水的年际变化较大，分期历史洪水又难以调查考证，因此其计算成果误差较大。对分期设计洪水成果，一般都要作合理性检查，分析各分期洪水的统计参数和同频率设计值的年内变化规律，并与年最大洪水的统计参数和同频率设计值进行比较。使用分期洪水成果，由于样本选择方法的不同，成果使用也不同。使用不跨期选样的成果，当邻期的设计值大于本期的设计值时，可将邻期成果移用于本

期的一定时间范围内，其移用范围一般不超过5～10天。

fenqi weiyan daoliu

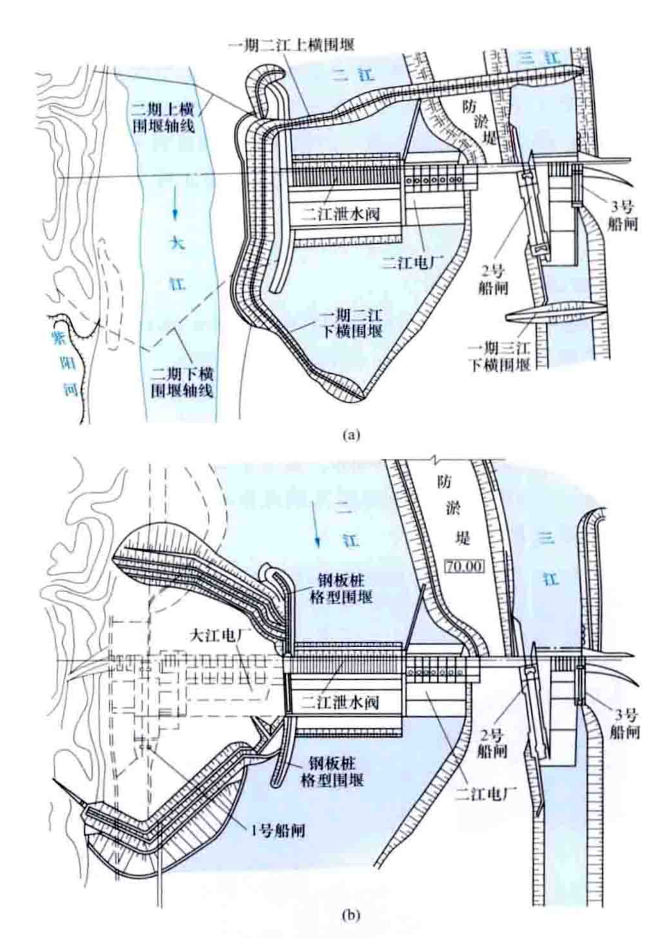
分期围堰导流 (stage diversion) 水工建筑物分期分段利用围堰挡水施工的施工导流方式。对拟修建的主体建筑物（如闸、坝等）分先、后期施工。先期修建的围堰只拦住一侧河床或一部分河床，构成第一期施工基坑，水流由基坑外被束窄的河道下泄。在第一期基坑内，需将闸、坝修建至某一临时挡水高程，并建成永久泄水建筑物或临时性的导流泄水建筑物（如底孔、梳齿、坝段缺口等）。当第一期主体工程施工告一段落，具备一定的挡水与泄水能力时，拆除第一期围堰，水流改由第一期工程已建成的泄水建筑物下泄（一般安排在枯水期进行），与此同时建成第二期围堰，拦断另一侧河床构成第二期施工基坑。分期围堰一般分为两期到三期。

分期围堰包括上游横向围堰、顺河的纵向围堰及下游横向围堰三部分。第一期基坑的上、下游横向围堰后期须拆除，所以往往设计为土石围堰。纵向围堰一般先、后期共用，常设计为混凝土结构，其自身的施工尚需在其临水面外侧修建一低挡水标准的围堰保护。纵向围堰是在一期基坑内修建的，它占据着部分主体建筑物的位置，为解决这一矛盾，常以这段主体建筑物代替纵向围堰。主体建筑物以外部分的纵向围堰也可用作永久工程，如作为导墙或隔墙等。二期上、下游横向围堰在主体工程完工后一般需拆除，但也有后期不拆除的，如不妨碍水库运用的上游围堰，可让它淹没在水库里。若一期基坑布置有电站时，有时可能利用二期围堰挡水以提前蓄水发电。有的工程将下游围堰留做二道坝，形成水池，在泄洪时起消能作用。

分期围堰导流适合于宽河床、大流量，主体建筑物结构允许分段施工、分段独自挡水的工程，故常用于混凝土重力坝工程。在宽河床上，尤其是有宽滩地的复式河床或河道中有岛礁、河心洲等地形条件时，这种导流布置最为方便。宽滩地在枯水期低水位时稍加围护，就能构成施工基坑。岛礁或河心洲地形便于布置纵向围堰。中国长江葛洲坝水利枢纽工程，挡水前缘长2561m，江中有葛洲坝和西坝两个岛地，将长江分割为大江、二江、三江3个河槽，导流布置条件好。工程分两期施工（见图），第一期围二江及三江，建泄水闸、河床式电站厂房及船闸；第二期大江截流，利用二江已建成的泄水闸导流。大江工程施工期间，二江电厂部分发电机组靠二期围堰挡水发电。

分期围堰导流的主要优点是：①第一期导流为原河床泄水，过水断面宽，泄流量大，围堰低；第二期只要修上、下游横向围堰，充分利用一期坝体布置泄水设施，如通过永久泄水闸底孔或缺口坝段导流，因而其施工导流工程规模小，费用较节省。②形成基坑的工期一般较短，有利于主体工程早开工。③对于具有河床式电站厂房或坝后式电站厂房，宜先围发电厂房段，可争取早发电。④原河床导流对施工初期河道通航十分有利。

分期围堰导流的主要缺点是：①主体建筑物不能整体平起施工。②分期修建围堰工期长，施工工程序多，工序不连贯。③施工场地和辅助工程设施需两岸布置，运行管理不便。器材物资供应要过河运输以及基坑内机械设备的转移等



长江葛洲坝水利枢纽工程施工导流布置图

(a) 一期工程施工导流平面布置图；(b) 二期工程施工导流平面布置图

因素，都将加大工程施工强度和工程费用。

fenmeihui

粉煤灰 (fly ash) 火电厂燃烧煤粉由烟道中排出的废弃粉末。又称飞灰。粉煤灰的化学成分主要为SiO_2、Al_2O_3、Fe_2O_3、CaO和MgO，是一种活性好、综合效益较优的混凝土掺合料。

粉煤灰的颗粒大多呈球形，颜色暗灰，视煤质不同而有深有浅。由无烟煤或烟煤煅烧收集的粉煤灰称作F类粉煤灰；由褐煤或次烟煤煅烧收集的粉煤灰称作C类粉煤灰，C类粉煤灰的氧化钙含量一般大于10%，在水电工程中使用较少。粉煤灰细度与水泥类似，磨细粉的比表面积为300～700m^2/kg，比重一般为2.1，表观密度一般为800kg/m^3。粉煤灰掺入混凝土后可改善混凝土的和易性，增加混凝土密实性、抗渗性和抗化学侵蚀性，降低混凝土水化热等。检验粉煤灰的品质指标主要有细度、需水量比、烧失量、含水量、SO_3含量、游离氧化钙含量、安定性等，并根据细度、需水量比、烧失量的不同分为Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ 3个等级。在水工混凝土中一般采用Ⅰ级和Ⅱ级标准的粉煤灰。粉煤灰的品质对混凝土质量影响很大，如需水量、干缩、强度和耐久性等方面。因此，一项工程在选用粉煤灰时，最好先用实际使用的水泥和骨料混在一起进行试验，以确定粉煤灰的适应性。

F类粉煤灰在水工碾压混凝土中的最大掺量为胶凝材料总质量的70%，在常态混凝土或钢筋混凝土中的最大掺量一般小于35%。当水泥用量不变时，可用粉煤灰取代部分细骨料，提高混凝土的强度。当骨料含有碱活性成分时，掺用一定量的粉煤灰可抑制碱-硅酸反应，防止混凝土因体积膨胀而开裂（见混凝土骨料）。

Fengman Shuidianzhan

丰满水电站 (Fengman Hydropower Station)

位于中国第二松花江中游、吉林省吉林市境内，下游距吉林市16km。电站以发电为主，兼有防洪、城市及工业供水、灌溉、生态环境保护、旅游及水产养殖等综合利用效益，见图1。电站装机容量1002.5MW，多年平均年发电量18.57亿kW·h，以8回220kV线路接入东北电网，担负系统调峰、调频和事故备用任务。



图1 丰满水电站

水文和水库特性 坝址以上流域面积42 500km²，占全流域的57.9%。多年平均流量442m³/s，多年平均年径流量139.4亿m³。500年一遇设计洪水洪峰流量25 100m³/s，相应库水位266.50m；10 000年一遇校核洪水洪峰流量36 300m³/s，相应库水位267.70m，总库容109.88亿m³；正常蓄水位263.50m，相应库容88.49亿m³；死水位242.00m，相应库容26.85亿m³；调节库容61.64亿m³，汛期防洪限制水位260.50m，防洪库容24.9亿m³，为年调节水库。

枢纽布置 枢纽工程由大坝、泄水建筑物、厂房等组成，见图2。

大坝 混凝土重力坝，坝顶高程267.70m，最大坝高91.7m，坝顶长1080m，上游坝坡坡度1:0.048、下游坝坡坡度1:0.78。纵缝将坝体分为4块，采用柱状块浇筑，未作接缝灌浆处理。

泄水建筑物 河床左侧溢流坝段布置11个溢流孔，孔宽12m、高6m。堰顶高程252.50m，最大泄流能力为10 450m³/s。采用差动坎挑流消能，高坎顶高程196.00m，挑角38°；低坎顶高程194.90m，挑角27°。左岸泄洪放空洞长682.9m，洞径9.2m，进水口底坎高程205.00m，最大泄流能力1234m³/s。进水口在正常蓄水位下38.5m，采用水下岩塞爆破方法施工，一次爆除量3794m³。

厂房 包括右岸坝后式厂房和左岸三期岸边式厂房。

右岸坝后式厂房布置10个坝式进水口，底板高程222.00m，用压力钢管引水。厂房长231m、宽22.6m、高47.13m，安装10台混流式机组，其中60MW机组1台、65MW机组2台、72.5MW机组5台、85MW机组2台。厂房上游侧布置10台（组）主变压器，其中1、7号为三相变压器，容量120MV·A；3号为三相变压器，容量170MV·A；4号为三相变压器，容量70MV·A；2、5、6、8、9、10号为单相变压器组，每组容量为90MV·A。室外开关站布置在厂房和大坝之间，为高式布置，采用双母线接线。

左岸三期岸边式厂房长95m、宽27.4m、高55.13m，安装2台140MW混流式机组。220kV变电站布置于副厂房北侧，采用双层布置，容量为180MV·A的2台三相变压器布置于底层，以1回220kV线路接入原厂开关站。

综合利用 丰满水电站是东北电网骨干电源，在系统运行中，其调峰、调频和事故备用作用突出，效益显著。水库蓄水后，入库洪峰大于10 000m³/s的洪水有6次，其中1995年和2010年入库洪峰分别为19 500m³/s和19 700m³/s，最大下泄流量4500m³/s，削减洪峰15 000m³/s和15 200m³/s，消峰作用显著。根据灌溉期需要，电站加大发电放流，流量为350m³/s，灌溉面积约347万亩。为满足吉林江段的环境及吉林市用水要求，丰满水电站在枯水期加大发电放流，流量为150m³/s。丰满水库又称松花湖，为国家级AAAA级风景区。松花湖养殖水面48.5万亩，2009年年产量约3000t。

主要建筑物运行性态 丰满大坝经续建、改建后投入正常运行，但因工程质量低劣，进行了多次加固。1954～1980年，坝基和坝体防渗灌浆分别为10 483m和13 384m，补修上下游坝面24 341m²。至20世纪80年代，大坝在风化、冰冻和溶蚀作用下，老化现象明显，坝体表面严重破损，呈软化、疏松和剥落状。1986年泄洪时，溢流面发生部分冲蚀事故，冲蚀面积7500m²，冲深2～3m，冲蚀混凝土1917m³。1986年调查，上游面破损约1300m²，下游面破损

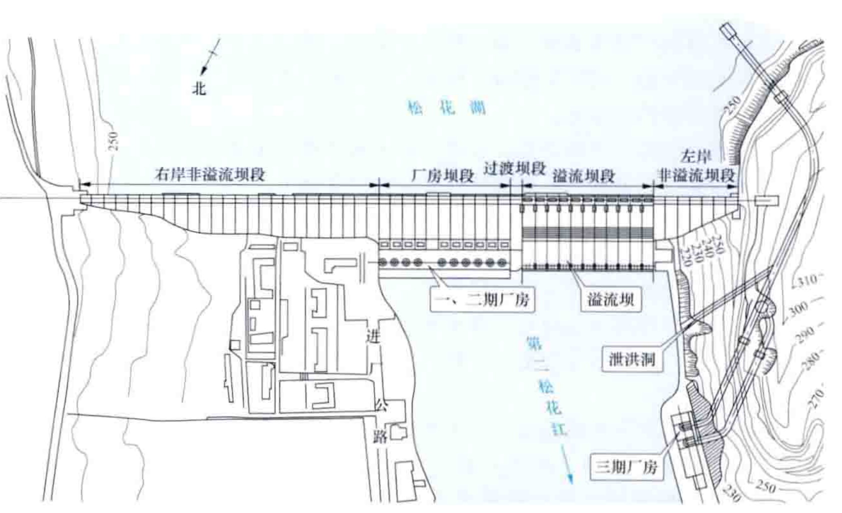


图2 丰满水电站枢纽平面布置图（1997年三期工程竣工时）

6100m²（不含溢流面），破损深度一般为10～40cm，个别达1m多。溢流面局部受渗水冻胀作用，坝面凸起龟裂。坝体漏水造成混凝土溶蚀，经水质化验分析，平均每年溶出石灰质9.02～9.84t，遂对大坝进行全面加固处理。大坝加高1.2m，上游面225～245m高程之间挂混凝土预制板，混凝土预制板与坝面之间灌沥青混凝土，形成厚10cm的防渗层。245m高程以上坝面外包混凝土。对渗漏较大的坝段，进行坝体水泥灌浆处理。

丰满大坝经过不断的维修、加固和补强，基本维持了大坝的安全运行状况。截至2012年，大坝运行近70年。经现场检测和安全评定，大坝整体性差，坝体混凝土强度及抗渗、抗冻等级低，渗漏渗压异常，混凝土冻融冻胀和溶蚀破坏较严重，断层坝段抗滑稳定安全性和校核洪水标准下防洪能力不能满足现行规范要求。在多家机构参与研究论证提出加固方案的基础上，经对重点方案进行深入比较和专家组综合分析，推荐采用重建方案作为丰满全面治理方案。方案将在原址下游120m处新建一座大坝，增建过鱼设施，并利用原丰满三期工程。重建工程不改变水库主要特征水位，不增加库区移民和征地。工程实施后仍维持原有的综合利用。新建电站装机容量1200MW，利用三期工程的280MW，总装机容量1480MW，多年平均年发电量17.09亿kW·h。新建电站以1回500kV线路接入东北电网，利用三期电站2回220kV线路接入东北电网。

工程施工 电站于1937年开工建设，1943年第一台机组发电。1945年，土建工程完成89%，工程质量低劣。1948年恢复建设工作，1951年开始进行大坝加固和扩建，1953年大坝全部建成，1959年完成8台机组的安装。1978年增加左岸泄洪洞。1988年利用预留的2条压力钢管进行二期（9、10号机组）扩机，1991年第一台机组发电。1995年进行三期扩建工程，包括利用左岸泄洪洞安装两台（11、12号）机组及在下游10.3km处修建永庆反调节水库，三期工程第一台机组于1997年发电。重建工程于2012年10月29日开工，工程总工期78个月。

设计单位 水利部东北勘测设计院（现中水东北勘测设计研究有限责任公司）承担了工程二期扩机、三期扩建设计和重建方案设计。

建设单位 国网新源控股有限公司丰满发电厂。

feng

风 （wind） 空气相对于地面的运动。气象上常指空气的水平运动。以风向、风速（风力）表示。风向指风的来向，一般以16个方位（见表1）或360°表示。风速（风力）是空气在单位时间内移动的水平距离，以m/s计。气象台（站）测定平均风速和最多风向常用风向风速计。没有仪器时，可根据炊烟、旌旗、布条展开的方向及人的感觉按风力等级表估计风力（见表2）。风力等级表系根据1805年英国人F.蒲福（F.Beanfort，1774—1857）所提出的风力等级修订的。上述均针对地面风而言。气象部门还观测高空风，通常释放气球用经纬仪观测。风既是天气预报的必要项目，又是预报其他天气项目的重要依据。水电站设计中，挡水建筑物的风浪超高计算及输电线杆塔设计要依据当地的风向、风速资料。水电站施工期间安排高空作业也需要了解风的情况。

表1 风向缩写表（16方位）

风向	缩写	风向	缩写
北东北	NNE	西南	SW
东北	NE	西西南	WSW
东东北	ENE	西	W
东	E	西西北	WNW
东东南	ESE	西北	NW
东南	SE	北西北	NNW
南东南	SSE	北	N
南	S	静风	C
南西南	SSW		

表2 风力等级表

风力等级	名称	陆上地物特征	相当于平地10m高处的风速（m/s）	
			范围	中数
0	无风	静，烟直上	0.0～0.2	0
1	软风	烟能表示风向，但风向标不能转动	0.3～1.5	1
2	轻风	人面感觉有风，树叶有微响，风向标能转动	1.6～3.3	2
3	微风	树叶及小枝摇动不息，旗帜展开，高的草摇动不息	3.4～5.4	4
4	和风	能吹起地面灰尘、纸张，树的小枝微动	5.5～7.9	7
5	清劲风	小树摇动，内陆水面有小波	8.0～10.7	9
6	强风	大树枝摇动，电线呼呼有声，撑伞困难	10.8～13.8	12
7	疾风	全树摇动，迎风步行感觉不便	13.9～17.1	16
8	大风	折毁小树枝，人迎风前行阻力甚大	17.2～20.7	19
9	烈风	草房遭到破坏，屋瓦被掀起，大树枝折断	20.8～24.4	23
10	狂风	树木可被吹倒，一般建筑物遭破坏	24.5～28.4	26
11	暴风	大树可被吹倒，一般建筑物遭严重破坏	28.5～32.6	31
12	飓风	陆上少见，摧毁力极大	≥32.7	

Fengtan Shuidianzhan

凤滩水电站 （Fengtan Hydropower Station） 位于中国沅水支流酉水上，湖南省沅陵县境内，开发任务以发电为主，兼有防洪、灌溉和航运等综合利用效益，见图。电站装机容量800MW，多年平均年发电量24.886亿kW·h。2回220kV输电线路向常德和益阳送电，3回110kV输电线路向周围地区送电。



图 1　凤滩水电站

水文和水库特性　坝址以上流域面积 17 500km²。多年平均年径流量 155.23 亿 m³。水库总库容 17.33 亿 m³，具有季调节性能。大坝的设计洪水标准为 1000 年一遇，相应洪水流量 29 400m³/s，相应库水位 209.56m。校核洪水标准为 5000 年一遇，相应洪水流量 34 800m³/s，相应库水位 211.44m；正常蓄水位 205.00m，相应库容 13.9 亿 m³；死水位 180.00m，相应死库容 5.35 亿 m³；调节库容 8.55 亿 m³，汛期防洪控制水位 198.50m，防洪库容 6.22 亿 m³。

工程地质条件　坝址区为前震旦系板溪群砂岩夹少量板岩，岩性致密坚硬，但断层、节理发育。

枢纽布置　枢纽工程由大坝、泄水建筑物、厂房、通航建筑物、扩机工程等组成，见图 2。

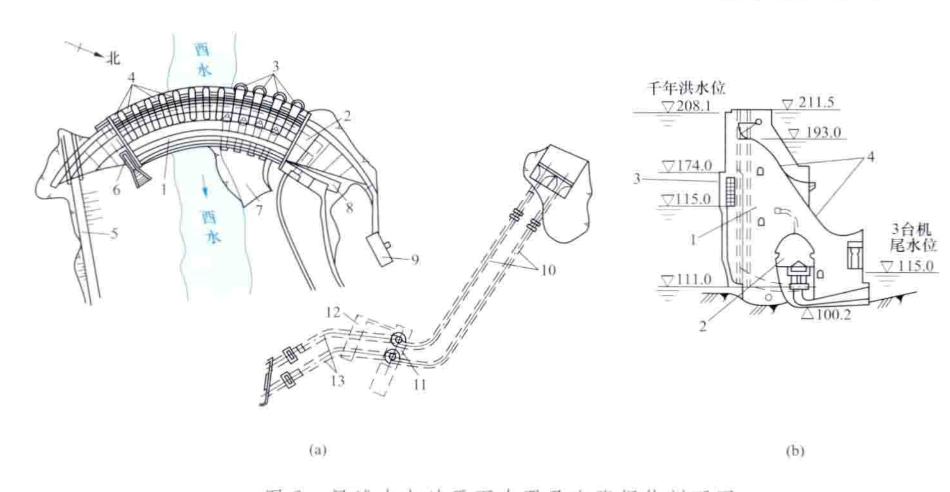


图 2　凤滩水电站平面布置及空腹坝体剖面图

(a) 平面布置图；(b) 电站坝剖面

1—大坝；2—坝内厂房；3—机组进水口；4—溢洪道；5—筏道；6—放空底孔；7—尾水渠；8—开关站；9—扩机出线平台；10—引水隧洞；11—地下厂房；12—主变压器洞；13—尾水隧洞

大坝　混凝土空腹重力拱坝，最大坝高 112.5m。坝顶高程 211.50m，坝顶弧长 488m。坝内空腹沿坝轴线长 255.8m，宽 20.5m，高 40.1m。

泄水建筑物　坝顶设 13 个溢流孔，堰顶高程 193.00m。孔口宽 14m、高 12m。最大泄流能力 30 920m³/s。采用高低鼻坎挑流消能。大坝右侧设一个放空底孔，矩形进水口，控制断面尺寸 6m×7m，最大泄流量 1236m³/s。

厂房　布置于坝段空腹内，尺寸为 85.0m×20.5m×40.1m（长×宽×高）。厂内装有 4 台 100MW 混流式水轮发电机组。水轮机转轮直径 4.1m。压力钢管直径 5.6m。电站设计水头 73m，最大水头 91m，最小水头 54m。电站最大引用流量 648m³/s。开关站位于大坝左岸，3 台三相双线圈 120MV·A 和 1 台三相自耦 240MV·A 主变压器布置在左岸进厂洞口靠上坝公路侧。

通航建筑物　右岸筏道设有一座垂直加斜面升船机，通航吨级为 50t，年运木材 14.5 万 t，货物 10 万 t。

扩机工程　位于左岸，进水口距左坝头约 220m，为竖井式进水口。进水口底板高程 163.50m。单机单洞引水，引水洞为直径 9m 的圆形隧洞。尾水洞为直径 11.5m 的圆形隧洞。地下厂房尺寸为 88.8m×22.3m×57.653m（长×宽×高）。厂内装有 2 台 200MW 混流式水轮发电机组，设计水头 73m，最大水头 85.72m，最小水头 60.64m。主变压器洞平行布置于厂房下游侧，尺寸为 57.835m×14.25m×16.5m（长×宽×高）。出线平台布置在左坝头附近。

工程施工　工程于 1970 年 10 月开工，1978 年 5 月第一台机组发电，1979 年 12 月 4 台机组全部投产。扩机工程 2002 年 2 月开工，2004 年 5 月第一台机组发电，2004 年底竣工。

设计单位　先后由湖南省水利水电勘测设计院和中南勘测设计研究院（后者现为中国水电顾问集团中南勘测设计研究院）设计。

fuhe cailiao lixue

复合材料力学　(mechanics of composite materials)

研究由两种或两种以上不同性能的材料在宏观尺度上组成的多相固体材料力学问题的学科，是固体力学的一个新兴分支。复合材料在力学特性方面的重要特点是具有明显的非均匀性和各向异性性质。

复合材料由增强物和基体组成，增强物起着承受载荷的主要作用，其几何形式有长纤维、短纤维和颗粒状物等多种；基体起着黏结、支持、保护增强物和传递应力的作用，常采用橡胶、石墨、树脂、金属和陶瓷等。现代复合材料主要有两类：①纤维增强复合材料，主要是长纤维铺层复合材料，如玻璃钢，具有优良的力学、物理和化学性能，在航空航天、武器装备、机器仪表、化工管道和容器、运输工具、建筑结构和医疗器械等领域均得到了成功应用；②粒子增强复合材料，如土木、水电等工程中广泛应用的钢筋混凝土等。

复合材料力学的研究内容主要包括 3 个方面：①在考虑复合材料非均匀和各向异性特点，以及材料几何（各材料的形状、分布、含量）和铺层几何（各单层的厚度、铺层方向、铺层顺序）等因素的条件下，结构在外力作用下的强度、刚度、稳定性和振动等力学问题；②层间应力（层间正应力和剪应力耦合会引起复杂的断裂和脱层现象）、边界效

应以及纤维脱胶、纤维断裂、基体开裂等复合材料的特有力学问题；③复合材料的材料设计（包括材料选取和组合方式的确定等）、加工工艺过程（如材料铺层、加温固化等）和结构设计过程中的力学问题。

复合材料力学的研究手段包括微观力学、细观力学和宏观力学3个层次。微观力学的研究是通过对分子、晶体及化学键等的微观分析，研究纤维和基体的力学特征，以及纤维和基体相互结合的力学问题。细观力学的研究是分别研究纤维和基体的各种力学特征，进而分析得到单项层材料的力学特性，研究如何提高纤维和基体的力学性能，以及采用哪种纤维和基体更有利于提高单项层材料的力学性能。宏观力学的研究是基于单向层材料的力学特性，研究多向层材料的力学特性及复合材料多向层板（壳）结构的力学设计手段和力学计算方法，由于多向层材料由若干不同方向的单向层材料构成，因此必须考虑材料在厚度方向的非均匀性。

fuchangfang

副厂房 （auxiliary power house） 用于布置水电站运行必需的各种辅助机械、电气控制设备、配电装置、公用辅助设备，以及用作生产调度、检修、测试等的用房。副厂房应设置的房间类型及各种房间的面积大小，主要由水电站的装机规模、在电力系统中的位置、自动化水平及所在地区环境条件等决定。设置原则是满足水电站运行、维修、管理需要，又尽量节约工程费用。大中型水电站副厂房一般设有中央控制室，继电保护室，计算机室，电缆室，发电机电压配电装置室，厂用电设备室，蓄电池室，直流电源室，通信室，油系统室，供水和排水泵房，空气压缩机室，通风空调机房，电气试验室，电工修理间，机械修理间，调度、值班、办公、资料等用房。小型水电站可简化合并。

中央控制室 集中监视和控制水电站运行的场所。室内净空高度一般为4～5m，面积由控制方式和水电站规模决定，有良好的照明、通风、防潮、采暖、空调、隔声、防虫、防尘等性能。有的小型水电站控制设备较少、操作简单，监控表盘设在主厂房内，无专门的中央控制室。也有的大型水电站实行远程控制，主要监视和控制设备布置在远离主厂房的中央控制楼内，副厂房内只设置简易的中央控制室。

继电保护室 为了运行管理方便，大中型水电站常将大部分继电保护装置（见水电站继电保护）集中布置在单独的继电保护室内，并紧靠中央控制室。当开关站离中央控制室较远时，可在开关站内另设输电线路和高压侧电气设备的继电保护室。继电保护室的室内环境要求与中央控制室基本相同。

计算机室 大中型水电站一般使用计算机进行运行、保护、调度、监视及监测数据处理。计算机室一般邻近中央控制室，防尘及室内温度、湿度应符合要求。

电缆室 又称电缆层，中央控制室和继电保护室下面电缆密集，大中型水电站常设有专门的电缆层，净高一般为2～3m。

发电机电压配电装置室 又称发电机电压开关室，布置发电机出线的配电装置，一般靠近发电机出线一侧，以尽量缩短发电机电压侧接线长度。有的将配电装置集中布置于一室，有的按机组单元分室布置。室内净空要满足设备的搬运、检修、试验和观察要求，室内的隔墙和通道要符合防火、防爆的规定。

厂用电设备室 布置厂用变压器和厂用电高、低压配电装置。安装油浸式厂用变压器的小间要用防火墙、防火门隔离，地面设有贮油坑等设施。厂用电高、低压配电装置通常分置于单独房间内。

蓄电池室 蓄电池是水电站二次设备的直流电源（见控制电源），一般设有专门的通风机，将有害气体排出厂房外。布置位置要避免设在中央控制室、继电保护室、配电装置室、通信室的上部，并最好能直通厂房外。蓄电池室、酸室及套间的地面、墙裙、台架都要用耐酸蚀材料铺砌，地面能防渗并有排水设施，墙壁及屋顶天花板要严密无缝并能防腐蚀。对非防爆式蓄电池室还要考虑可向外泄压。

直流电源室 又称充电机室，供蓄电池充电用。充电设备可用整流充电装置或充电机。当用充电机充电时，因其振动和噪声影响大，一般都远离中央控制室。

通信室 包括载波机室、交换机室和值班室等，要求环境安静、清洁，房间数和面积由设备布置要求定。

油系统室 包括油罐室、油处理室和油化验室，又分为绝缘油和透平油两类。绝缘油系统用房多设在厂房外交通方便的地方。有的电站透平油系统用房设在厂房内，如安装间下层或与水轮机层高程接近的地方。油罐室和油处理室要有防火措施，并与其他房间隔离。油化验室可设在厂房内或厂房外，具备良好通风、防尘、防火条件。

供水和排水泵房 采取下游水泵供水的水泵房常布置于尾水副厂房底层。采取上游自流引水时，供水设备有的设在厂、坝间副厂房中，有的设在机组旁。机组检修排水和厂房渗漏水排水的卧式泵房和集水井通常布置在厂房基础最低处，当设有立式深井泵时，其电动机一般置于设计尾水位以上。

空气压缩机室 一般布置在安装间下层、副厂房下层等适宜利用的场所，要避开中央控制室、继电保护室、电子计算机室、通信室等对防振、防噪声有较高要求的房间或设备。

通风机房 地面封闭式厂房、地下和坝内式厂房，一般都设有机械通风系统，通风系统的通风机运行时噪声较大，主要通风机应尽量远离对环境要求较高的场所，并要注意做好通风机房及风道的隔音和防振。

电气试验室 一般布置在运输方便和设备较集中的地方。室内要有良好的通风、采暖、防尘、防潮设施。

电工修理间、机械修理间、工具间 规模及所配备器具视水电站装置的设备情况而定。

调度、值班、办公、资料等用房 根据水电站规模、自动化程度及机构和人员编制情况因地制宜布置。



gaocheng

高程 （elevation） 地面点到高度起算面的垂直距离。以平均海水面为零点起算的高度为绝对高程，或称海拔；以任意基准面起算的高程为相对高程或称假定高程。测量学中还采用不同的基准面计算的高程系统。①地面点沿垂线方向至大地水准面的高度为正高系统；②地面点沿正常重力线至似大地水准面的高度为正常高系统；③地面点沿法线至参考椭球面的距离为大地高系统。

中国采用正常高系统。1959年启用“1956年黄海高程系统”，统一全国高程系统；1987年启用“1985国家高程基准”，废止“1956年黄海高程系”。两者的差值为0.029m，其关系为

$$\frac{\text{1985国家高程}}{\text{基准高程}}=\frac{\text{1956年黄海}}{\text{高程系高程}}-0.029\text{m}$$

全国高程系统统一之前，水利水电部门为江河流域的河道治理、规划设计及工程建设需要，以及旧中国的军事和铁路等部门曾设有吴淞、大沽、大连、废黄河、坎门、珠江、罗星塔等高程系，还有假定高程等。因黑龙江及鸭绿江等国际河流的合作开发，曾联测了前苏联的波罗的海高程系统和朝鲜的仁川高程系统。

gaocheng kongzhi celiang

高程控制测量 （vertical control survey） 在全国或某区域内求得控制点统一的高程值所进行的测量工作。中国国家高程控制网又称国家水准网，分为一、二、三、四等4个等级，采用精密水准测量方法建立。一等水准是国家高程控制网的骨干，是研究地壳垂直运动及有关科学问题的依据；二等水准附合于一等水准环上，是国家高程控制的全面基础；三等水准、四等水准测量直接为地形测图和各种工程建设提供所必需的高程控制。为了控制整个流域或河流（河段）的开发治理，水电工程高程控制测量一般沿河布设水准路线或组成环网等，并与国家水准点联测。水电工程高程控制测量等级在国家高程控制等级外增加五等水准测量。水电工程高程系统采用国家高程系统，特殊地区则可采用临时的近似高程或假定高程系统，埋设坚固的标石以待日后联测。高程测量方法有水准测量、三角高程测量、气压高程测量和GNSS高程测量等。

水准测量 利用水准仪和水准尺测定地面两点之间高差的测量方法，又称几何水准或直接水准，是高程测量的基本方法。根据不同的精度要求与作业方法，分为：①精密水准测量。指一、二等水准测量，施测时除采用精密水准仪和因瓦水准尺之外，操作规定中严密考虑了系统误差与偶然误差的消除和防止积累。GB/T 12897—2006《国家一、二等水准测量规范》规定，一等水准测量每千米偶然中误差不得超过±0.45mm，每千米全中误差不得超过±1.0mm；二等水准测量每千米偶然中误差不超过±1.0mm，每千米全中误差不超过±2.0mm。精密水准测得的高差应加入正常重力位水准面不平行和重力异常改正，归化为正常高。②普通水准测量。一般指三、四等水准测量，用于加密精密水准网，或建立独立测图的高程控制和工程测量的高程控制，以及联测大地控制点的高程。一般采用普通水准仪和区格式双（黑红）面水准尺中丝读数法。三等水准以“后前前后”顺序观测，四等水准以“后后前前”顺序观测，视距长度可视仪器精度不同适当放宽。③跨河水准测量。在水准路线遇到不可避免的障碍如江河、湖塘、宽沟、山谷等视距长度超过规范要求时可采用跨河水准测量。跨河水准测量方法包括光学测微法、倾斜螺旋法、经纬仪倾角法、测距三角高程法、GNSS水准法等，条件适合的寒冷地区还可采用冰上过河法。四等水准测量时可在平缓河流、静水湖泊、池塘等没有明显横比降地段用水面传递高程。

三角高程测量 又称电磁波测距三角高程测量，是通过观测两点间的水平距离和天顶距（垂直角）求出两点间的高差的方法，又称间接高程法。多数应用于地形起伏较大地区平面控制点的高程联测，可以代替四等及以下水准测量。三角高程测量受大气折光影响较大，宜采用对向观测消除其影响，当单向观测时必须作折光系数 K 的改正。三角高程测量可采用单一路线、闭合环、结点网等形式布设，路线一般选择边长较短和高差较少的边组成，起讫于水准高程点上。在水电工程测量中还可代替三等水准。

气压高程测量 应用气压计测定两点气压差推算高差进行高程测量的方法。大气压力以毫米水银柱（mmHg）高度表示，随高度而变化，每升高11m，压力减少1mmHg。由于大气压受气象变化影响很大，只用于低精度的高程测量或踏勘时的草测。其优点是使用方便。中国法定压力单位采用帕（Pa），它和毫米水银柱（mmHg）间的换算关系为

$$1\text{mmHg}=133.332\text{Pa}$$

GNSS高程测量 利用全球导航卫星系统（GNSS）测量技术直接测定地面点的大地高，或间接确定地面点的正常高的高程测量方法。GNSS测量技术间接确定地面点的正常高的方法：先测定区域内所有GNSS点的大地高，再用水准测量方法测量部分GNSS点的正常高并计算其高程异常（大地高与正常高之差），采用平面或曲面拟合的方法获得测区内其他GNSS点的正常高。这种区域性的GNSS水准高程方法的精度，取决于GNSS测定大地高的精度、水准联测的精度、坐标变换精度和拟合计算精度。一般认为在有严密技术设计的条件下可以达到四等水准测量的精度要求。

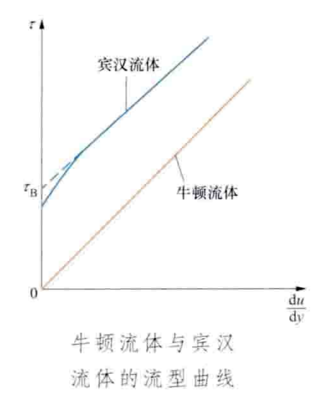
gao hansha shuiliu

高含沙水流 （hyper-concentrated flow） 含沙量很高，流体性质发生改变，需要把水和泥沙的混合物作为一

个整体考虑的水流。自然界中的泥石流、高含沙洪水及管道高浓度输送的流动浆体均属于高含沙水流。

判定是否为高含沙水流不仅取决于含沙量的大小，更重要的是所含泥沙颗粒的粗细和矿物成分。细颗粒泥沙即使含沙量较少，也将影响流体的性质，使之具有高含沙水流的特性。粗颗粒泥沙则要达到很高的含沙量才会使流体具有高含沙水流特性。对发源于黄土高原的黄河干支流，一般含沙量超过 300～400kg/m³ 时即成为高含沙水流。

性质 含有大量泥沙颗粒，特别是细颗粒的浑水，已不再是牛顿流体而成为非牛顿流体。多数情况下高含沙浑水可以近似地用宾汉流体描述。只有当切应力 τ 大于某一初始值 τ_B（宾汉切应力）时，这种流体才会发生流动，而且其黏性远大于清水的黏性，见图，图中 $\frac{du}{dy}$ 为 y 点的切变速率。



牛顿流体与宾汉流体的流型曲线

高含沙浑水黏性大幅度增加和存在宾汉切应力，导致其中的泥沙颗粒的沉速大幅度减小，甚至有些颗粒在浑水中保持静止。在高含沙浑水中保持不下沉的最粗颗粒的粒径，可由浑水的宾汉切应力、密度以及泥沙的重率确定。粗颗粒在高含沙浑水中的沉速可用类似于清水中确定颗粒沉速的方法，即按颗粒的阻力系数与雷诺数的关系曲线试算确定。此时雷诺数组成中的黏滞系数要用包括宾汉切应力的有效黏滞系数代替。

“浆河”与“揭河底”现象 高含沙浑水具有极高的黏性、极小的泥沙颗粒沉速和极大的挟沙能力，使得高含沙洪水通过河道时常会发生异常剧烈的冲淤现象。中国陕北黄河的一些小支流曾观察到在高含沙洪水的落水过程中，整河浑水会产生停滞和流动交替的间歇运动，称为“浆河”现象。黄河干流龙门水文站曾观察到当高含沙洪峰通过时，厚约 1m 的成片河床泥沙被揭掀起露出水面，短时间内河床有大幅度冲刷，称为“揭河底”现象。如 1970 年 8 月初的一次高含沙洪峰过程，在十四五个小时内，使龙门站测流断面的河床刷深 9m。

应用 高含沙浑水中泥沙颗粒沉速大幅度减小，泥沙颗粒不易落淤，使高含沙水流挟沙能力远大于一般挟沙水流。高含沙引洪淤灌、管道高浓度输送、水库高含沙异重流排沙等，都是利用此特性输送更多的泥沙或其他物质（如煤）。高含沙水流的阻力一般大于清水，但恰当的颗粒级配组成可以使其阻力减小。

gaosu shuiliu

高速水流 (high velocity flow)

流速较高，出现空化、掺气、雾化、脉动、振动等的水流。一般将流速超过 20m/s 的水流视为高速水流。高速水流问题研究，旨在为水电站建筑物防蚀、防振、防磨、防冲及消能设计，寻求技术可行、经济合理的工程措施。

对高速水流的研究随着高坝建设的发展逐渐形成的水工水力学的分支学科，主要研究内容包括：

(1) 高水头的泄水建筑物或其他过流边界处，因局部压力降低而发生的空化现象与空蚀破坏。（见空化、空蚀）

(2) 高速水流与空气接触面上，气水掺混而形成的水流掺气和挑流雾化现象。（见掺气水流）

(3) 高速水流过水面上动水压力脉动及其诱发的薄体结构物振动现象。这种场合，需考虑水流与结构弹性变形的相互作用，因而发展了考虑附加质量、附加阻力的水弹性力学。（见水弹性理论）

(4) 陡坡明渠在突然收缩、扩散、转弯、变坡的地方往往产生斜向驻波，即冲击波。明渠急流冲击波也是高速水流现象之一。为工程运行安全计，需研究消除冲击波的方法，具体计算常用特征线法。

(5) 高速含沙水流对过流面的磨损，亦属高速水流问题。建在多沙河流上的水电站，汛期泄洪、排沙、发电，往往造成泄水孔、排沙洞或水轮机过流面的磨损，如中国黄河三门峡水库底孔遭受泥沙磨损就是典型的例子。

gaoya penshe guanjiang

高压喷射灌浆 (high pressure jet grouting)

利用高压射流冲切破坏地层，并将注入的水泥浆液与原地层颗粒就地混合搅拌，同时随着喷射流束的不同运动方式形成所需防渗或加固体的工程技术，简称“高喷”。主要优点是施工简便、灵活，进度快，应用范围广，适用于淤泥质土、粉质黏土地层以及粉土、砂土、砂卵砾石等松散透水地基或填筑的地层。

高喷形式 单孔高压喷射灌浆的基本形式有旋喷、摆喷和定喷 3 种。高喷防渗墙（简称“高喷墙”）的结构形式根据上述基本形式的一种或几种组合而成，分为旋喷套接、旋喷摆喷（或旋喷定喷）搭接、摆喷对接或折接、定喷折接等。

在实际工程中，防渗结构形式根据工程的具体情况和地质条件经技术、经济比较后确定。通常应注意几点：①定喷和小角度摆喷适用于粉土和砂土地层。②承受水头较小或水头较大但历时短暂的工程，可采用小角度摆喷或定喷折接形式。③深度小于 25m 的卵砾石地层，可采用摆喷对接或折接；深度大于 25m 时，宜采用旋喷或旋摆结合形式。④对防渗效果而言，以旋喷、旋摆结合形式为好。

高喷浆液材料应根据高喷的目的和要求而定，一般多采用水泥浆液。有特殊需要时，可在水泥浆液中加入膨润土或其他掺合料。

施工工艺 高喷灌浆钻孔一般采用回转钻机、冲击钻机、冲击回转钻机等钻进，孔径应大于喷射管外径 20mm 以上。高喷灌浆在钻孔完成后进行，依其施工工艺不同，通常分为单管法、双管法、三管法、新三管法 4 类。

(1) 单管法。喷射管为单一管路，喷射介质仅为水泥基质浆液，用高压浆泵以不小于 20MPa 的高压从喷射杆底部的喷嘴喷射出，冲击破坏地层。水利水电工程地基防渗一般不常采用。

(2) 双管法。喷射管为二重管或两列管，喷射介质为水泥基质浆液和压缩空气两种介质，或水和水泥基质浆液由喷嘴喷射出，冲击破坏地层。浆压高达 45～50MPa，气压为 1～1.5MPa。

(3) 三管法。喷射管为三重管或三列管组成的喷射杆，分别输送水、压缩空气、水泥基质浆液3种介质。先使用高压水和气的射流冲击破坏地层，呈翻滚松散状态；随后再以低压灌注浓浆，掺混搅拌，凝固后形成凝结体。一般情况下水压约为40MPa，气压为0.7～1.0MPa，浆压为0.3～0.5MPa。

(4) 新三管法。施工工艺与三管法相同，只是注浆采用20～30MPa的压力。

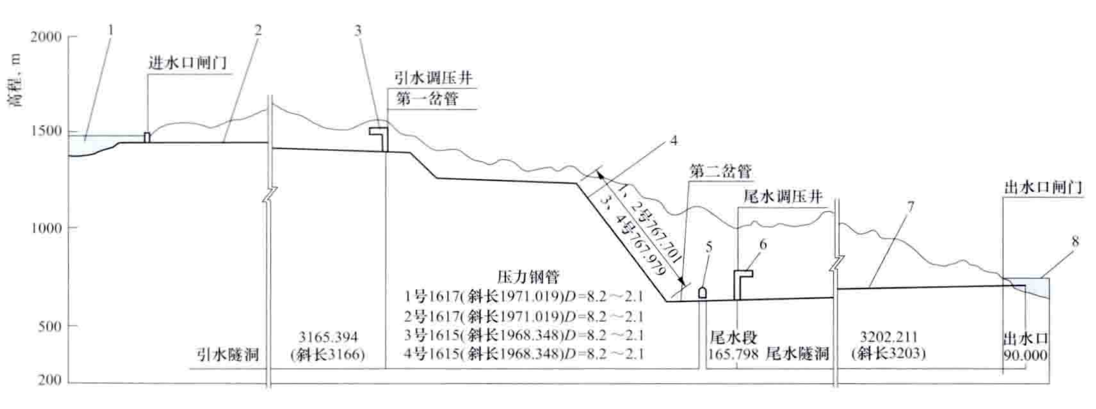
质量控制　施工过程中应对高喷灌浆材料、浆液和各道工序的质量进行控制。以防渗为主要目的的高喷施工，在施工结束后应钻检查孔或做围井进行注（压）或抽水试验，检验凝结体的防渗性能。如果是围堰防渗墙体，要在基坑开挖后，测试排水量和直观堰壁有无渗漏水情况。这是检验防渗墙体质量的明显、实用、有效的方法。

Geyechuan Choushui Xuneng Dianzhan

葛野川抽水蓄能电站

葛野川抽水蓄能电站 (Kazunogawa Pumped Storage Power Station)　位于日本山梨县，为一座纯抽水蓄能电站。电站装机容量1600MW。

枢纽布置　枢纽工程由上水库、下水库、泄水建筑物、水道系统、厂房等组成，见图。



葛野川抽水蓄能电站布置图

1—上水库；2—引水隧洞；3—上调压室；4—压力管道；5—地下厂房；6—尾水调压室；7—尾水隧洞；8—下水库

上水库　位于富士川水系笛吹川支流日川的源头，正常蓄水位1481.00m，死水位1460.00m，工作水深21m，总库容1120万m^3，调节库容830万m^3。大坝为黏土心墙堆石坝，最大坝高87m，坝顶长494m，坝顶高程1486.00m，上游面坝坡1∶2.7，下游面坝坡1∶2.0。考虑环保、节省投资及实行挖填平衡原则，心墙料主要使用来自库区的D级强风化角砾岩。

下水库　位于相模川水系葛野川支流土室川中游，正常蓄水位744.00m，死水位718.00m，工作水深26m，总库容1150万m^3，调节库容830万m^3。大坝为碾压混凝土重力坝，最大坝高105.2m，坝顶长263.5m，坝顶高程746.20m，上游面坝坡1∶0.1，下游面坝坡1∶0.82。碾压混凝土骨料采用砂岩泥岩块石，以及地下厂房、尾水洞的开挖石渣，施工中采用1m的碾压层厚，胶凝材料用量为110kg/m^3。

泄水建筑物　葛野川电站是跨流域工程，为保持各自流域径流总量不变，上、下水库均设置了4套泄水系统，10^2、10^1、10^0、10^{-1} m^3/s量级的流量分别从不同泄水系统下泄。上水库主要泄水设施位于右坝肩，为一侧槽式溢洪道，设计泄流量300m^3/s，还有一个可以下泄30m^3/s的泄水设施。下水库主要泄水设施采用坝身表孔，设计泄洪量为480m^3/s，另通过坝身底孔可下泄流量50m^3/s。上、下水库坝上设置了可连续调节高度的伸缩式滑动分层取水口，以控制下泄水温，取水流量均为2m^3/s。

水道系统　1条引水隧洞长3166m，内径8.2m，钢筋混凝土衬砌厚55～75cm。后接双室阻抗式调压室，竖井内径10m、高88.9m；阻抗孔直径5.7m；上室长87m，宽10m，高13m。出调压井后接2条压力钢管，长分别为1617m和1615m，内径4～5.7m，在水轮机进口前约100m处分为4条支管，内径为2.3～2.85m。钢管最大设计内压为11.5MPa。长约800m、倾角为52°的下斜井开挖时采用了隧洞掘进机。4条尾水管后接双室阻抗尾水调压室，竖井段内径10m，高120.8m；阻抗孔直径4.7m；上室长57m，宽10m，高10m。后接尾水隧洞，长3203m，内径8.2m。

厂房　主厂房位于地表下约500m深处，开挖尺寸为210m×34m×54m（长×宽×高），总开挖量25万m^3。2台主变压器分别布置于厂房两端，副厂房位于厂房左侧，安装场设在厂房中部。发电机层高程637.00m，机组安装高程620.00m。厂房内安装4台单级可逆混流式水泵水轮机，单机额定出力412MW，额定水头714m，最大水头728m，最大发电引用流量68.2m^3/s，最大抽水流量56.7m^3/s，最大扬程778m，最大出力438MW，吸出高度－98m。1号和2号机组为恒速机组，额定转速500r/min，分别由日立公司和三菱公司制造。3号和4号机组为变速机组，转速为480～520r/min，由东芝公司制造，是世界上最大单机容量的变速抽水蓄能机组。设计中采用了全水头模型试验技术对止水等部件进行试验。1号机组运行稳定，噪声、振动及尾水管中压力脉动均较小。发电电动机容量475MV·A，电动机容量438MV·A。主变压器采用低压双分裂变压器。

工程施工　工程于1993年1月开工，上水库、下水库分别于1997年6月和1998年6月开始蓄水，1999年12月第一台机组并网发电，2001年竣工。

Gezhouba Shuili Shuniu

葛洲坝水利枢纽

葛洲坝水利枢纽 (Gezhouba Hydroproject)　位于中国湖北省宜昌市，距长江三峡出口2.3km，是长江干流上第一座大型低水头水电、航运枢纽，具有发电、改善航道等综合效益，为长江三峡水利枢纽的反调节梯级，见图1。装机容量2715MW，多年平均年发电量157亿kW·h。通过后期1台保安电源机组的扩建和2台机组的改造增容，现

装机容量为 2777MW，最大出力达 2930MW。



图 1 葛洲坝水利枢纽

水文和水库特性 坝址以上流域面积 100 万 km^2，多年平均年径流量 4510 亿 m^3，多年平均流量 14 300m^3/s，多年平均年输沙量 5.2 亿 t。正常蓄水位 66.00m，死水位 63.00m。设计洪水流量 86 000m^3/s 时，相应坝前水位 66.00m，下游尾水位 59.50m；校核洪水流量 110 000m^3/s 时，相应坝前水位 67.00m，相应总库容 15.8 亿 m^3。

工程地质条件 坝基由黏土质粉砂岩、黏土岩、砂岩和砾岩等组成。

枢纽布置 枢纽工程由大坝、泄水建筑物、厂房、通航建筑物等组成，见图 2。

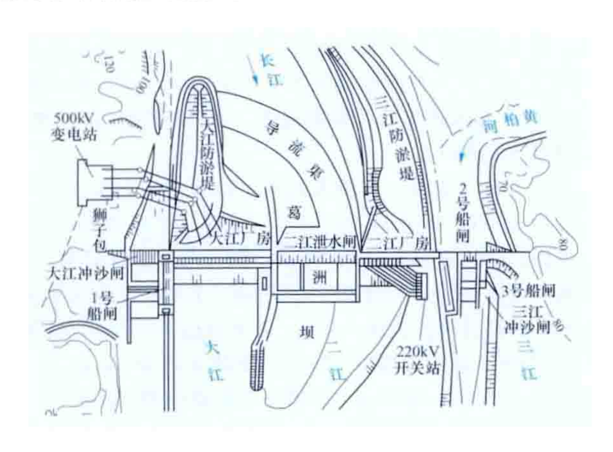


图 2 葛洲坝水利枢纽平面布置图

大坝 混凝土闸坝，最大坝高 53.8m，挡水前沿总长 2606.5m。包括左岸土石坝、黄草坝、混凝土心墙坝、三江混凝土非溢流坝、右岸混凝土挡水坝。

泄水建筑物 包括二江泄水闸、三江冲沙闸、大江泄水冲沙闸。

二江泄水闸共 27 孔，前沿总长 498m，最大泄流量 83 900m^3/s。闸型为开敞式平底闸，闸室长 65m，孔口宽 12m、高 24m。每孔设上、下双扉闸门，上扉为平板门，下扉为弧形门，均宽 12m、高 12m。闸后设有 180m 长的平底消力池，后接 70m 长的防冲护固段，闸尾设深 20m 的防淘墙和长 85m 并设有加糙墩的柔性混凝土海漫，总长 335m。

三江冲沙闸共 6 孔，总宽度 108m，最大泄流量 10 500m^3/s。采用平底闸，闸室长 58m。孔口宽 12m，高 10.5m。设弧形闸门。采用三级消力池，总长 405.5m。

大江泄水冲沙闸共 9 孔，每孔宽 12m、高 19.5m。闸室长 52.2m，底板高程 42.00m，最大泄流量 20 000m^3/s。

厂房 包括二江电厂厂房、大江电厂厂房，为河床式厂房。

二江电厂厂房长 327m，宽 33m，高 77.15m。厂内安装 2 台 170MW 和 5 台 125MW 轴流转桨式水轮发电机组，总容量为 965MW。水轮机转轮直径分别为 11.3m 和 10.2m，额定转速分别为 54.6r/min 和 62.5r/min。发电机均为伞式空冷型，额定电压 13.8kV，额定功率因数 0.875，额定容量分别为 194.2MV·A 和 143MV·A。

大江电厂厂房长 596.2m，宽 33m，高 76.14m。厂内安装 14 台 125MW 轴流转桨式水轮发电机组，总容量为 1750MW，机组参数和结构形式均与二江厂房 125MW 机组相同。

二江电厂主变压器采用发电机-变压器单元接线。高压侧为 220kV，采用双母线带旁路接线，出线 8 回，其中 2 回经 2 台 360MV·A 自耦变压器升压为 500kV，接入大江开关站。二江开关站采用铝管硬母线配单柱式隔离开关。大江电厂 7 台 300MV·A 的主变压器，3 组扩大联合单元接线和 1 组扩大单元接线。高压侧为 500kV，采用一个半断路器接线。进线 6 回，其中 2 回为二江开关站经自耦变压器与大江开关站的联络线。出线 6 回，其中 2 回各接 1 台 150MV·A 的并联电抗器。500kV 开关站位于大江厂房右岸上游 1km 处，采用连续多跨四分裂铝管组合硬母线配单柱式隔离开关布置，间隔间距 30m，总长 192m。220kV 和 500kV 系统间的联络变压器布置在 500kV 开关站。

直流换流站布置在大江厂房右岸下游 3km 处，由大江开关站出 2 回 500kV 线到直流换流站。换流站采用双极系统，每极有 1 组 600MW 的 500kV 阀组向华东电力系统输电，总容量 1200MW。

通航建筑物 共设 2 条航道和 3 座船闸。大江航道建有 1 号船闸（见图 3），三江航道建有 2 号和 3 号船闸。1 号和 2 号船闸，闸室有效尺寸相同，长 280m、宽 34m。最小坎上水深，1 号船闸为 5.5m，2 号船闸为 5m，可通过大型客货轮和万吨级船队。3 号船闸闸室有效尺寸，长 120m、宽 18m，最小坎上水深 3.5m，可通过 3000t 客货轮和地方船队。

工程施工 坝址处江面宽 2200m，分为大江、二江和三江。施工采用两期导流：一期工程于 1970 年开工，围二、三江施工，大江过流、通航，1981 年 1 月大江截流，6 月三江船闸通航，7 月二江电厂发电；二期工程于 1982 年开工，围大江施工，利用二、三江已

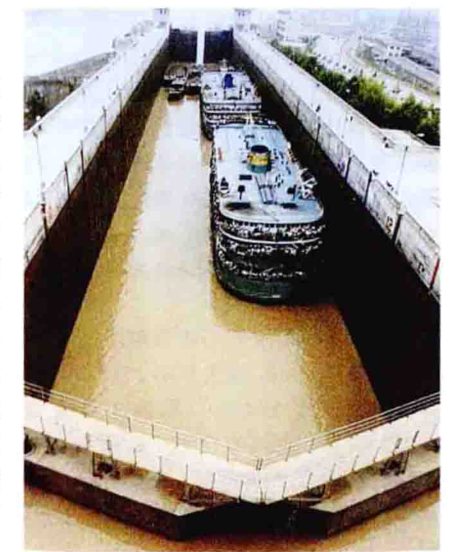


图 3 葛洲坝水利枢纽大江 1 号船闸

建的建筑物通航、泄流，1986年6月发电，1988年12月全部机组安装完毕，大江船闸建成；1989年建成完工。大江截流流量为4400～4800m³/s，最大落差3.23m，最大流速7.5m/s。

主要工程量：土石方开挖5800万m³，土石方回填3090万m³，混凝土浇筑1042万m³，钢筋、钢材32.7万t。

设计单位 长江流域规划办公室［水利委员会长江勘测规划设计研究院（现水利部长江勘测规划设计研究院）］。

Geheyan Shuidianzhan

隔河岩水电站 (Geheyan Hydropower Station)

位于中国湖北省长阳县清江干流，电站开发任务以发电为主，兼有防洪、航运等综合利用效益，见图1。装机容量1200MW，多年平均年发电量30.4亿kW·h。以2回500kV输电线路接入华中电力系统，担负调峰、调频任务，并以2回220kV电压向湖北省供电。



图1 隔河岩水电站

水文和水库特性 坝址以上流域面积14430km²，占流域面积的85%。多年平均流量403m³/s，多年平均年径流量127亿m³。1000年一遇设计洪水流量22800m³/s，相应库水位203.14m；10000年一遇校核洪水流量27800m³/s，相应库水位204.54m，总库容34.4亿m³；正常蓄水位200.00m，相应库容31.2亿m³；死水位160.00m，调节库容14.75亿m³（考虑5.0亿m³的防洪库容后），为年调节水库。

工程地质条件 坝址地层由石牌页岩、石龙洞灰岩及平善坝灰页岩互层组成。坝基岩体为石龙洞灰岩，岩层缓倾上游，岩性不均一，构造断裂切割严重，喀斯特发育。地震基本烈度Ⅵ度，设计烈度7度。

枢纽布置 枢纽工程由大坝、泄水建筑物、厂房、通航建筑物等组成，见图2。

大坝 混凝土三心圆变截面上重下斜拱式重力拱坝，坝顶高程206.00m，最大坝高151m，坝顶长653.5m（包括升船机及左岸重力坝段），坝顶宽8m，最大底宽（厚）80m。拱坝上游面为定圆心定半径的圆弧直立面，半径312m，下游坝坡坡度为1∶0.7～1∶0.5。采用斜拱方式封拱，溢流坝段封拱高程181.30m，向两岸拱座逐渐降低，左岸降至高程150m，右岸降至高程160m，重力坝下游坝坡坡度为1∶0.7。左岸设置重力墩。对两岸坝肩基础存在的不稳定块体，采用混凝土阻滑键、传力柱和置换混凝土处理。坝基设置防渗帷幕。

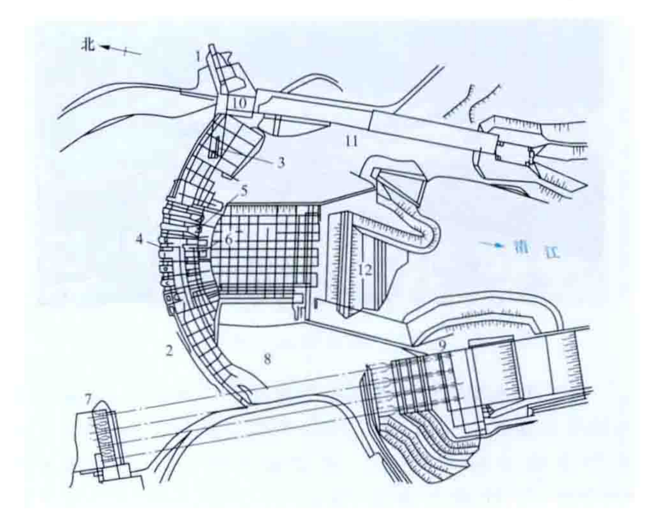


图2 隔河岩水电站枢纽平面布置图

1—左岸重力坝段；2—重力拱坝；3—重力墩；4—溢流表孔；5—泄洪深孔；6—放空底孔；7—进水口；8—引水隧洞；9—厂房；10—垂直升船机；11—导流隧洞；12—下游围堰

泄水建筑物 位于河床坝段，包括7个溢流表孔和4个泄洪深孔，相间布置。表孔尺寸为12m×18.2m（宽×高），堰顶高程181.80m，最大泄量19000m³/s。深孔进口底坎高程134.00m，出口控制断面尺寸为4.5m×6.5m，最大泄量4050m³/s。采用表孔不对称宽尾墩、深孔窄缝、新型射流-水垫池联合消能工。

厂房 位于右岸。岸塔式进水口，每机一个进口。主厂房尺寸为142m×38.6m×65.3m（长×宽×高）。内装4台机组，单机容量分别为300MW和306MW。单机单管引水。4条引水隧洞直径9.5m，后接直径8m的压力钢管。混流式水轮发电机组，水轮机转轮直径5.74m，额定转速136.4r/min，额定出力310MW，最高效率95.29%，设计点效率94.48%。发电机为空冷伞式，额定电压18kV，额定容量340MV·A，额定功率因数0.9。高压配电装置采用气体绝缘金属封闭电器，布置在厂房上游侧。

通航建筑物 垂直升船机位于左岸，采用两级全平衡钢丝绳卷扬系统，总提升高度124m，分为2级。可通过300t级船舶，年双向通过能力340万t。

工程施工 施工导流采用枯水期隧洞导流、汛期围堰过水的导流方式。工程1987年1月开工，1993年6月第一台机组发电，1994年11月第四台机组投产。

主要工程量：土石方明挖841.67万m³，石方洞挖66.20万m³，土石方填筑170.04万m³，混凝土浇筑392.79万m³，帷幕灌浆25.17万m，固结灌浆6.62万m，钢筋钢材7.33万t。

设计单位 水利部长江水利委员会（现长江勘测规划设计研究有限责任公司）。

建设单位 湖北省清江开发有限责任公司。

gongcheng celiang

工程测量 (engineering survey)

研究工程建设和自然资源开发中规划、设计、施工、运行等阶段进行的控制

测量、地形测量、施工放样、变形监测及相应信息系统建立等所有测量工作的总称。工程测量是以大地测量学、普通测量学、摄影测量学与遥感、地图制图学等的理论、技术和方法为基础，解决应用对象测量中的理论、误差分析处理和应用问题的特殊技术和方法，现已发展成为测绘学的一个二级学科——工程测量学。水电工程测量是工程测量的一个分支，贯穿于水电工程建设全过程，主要内容包括平面与高程控制测量、地形测量、断面测量、专题制图、建设征地测量、移民安置工程测量、专项复建工程测量、施工测量、变形监测等。根据工程建设阶段的不同，内容各有侧重。

测量内容 包括：①规划阶段测量。侧重全河流或规划河段的中、小比例尺地形测图测绘和制作影像图测绘、纵横断面测量、水文站网联测及其他地理信息获取、专题图编制等，并为上述工作而进行沿河平面与高程控制网的测量。②预可行性研究阶段测量。侧重水电站工程的枢纽区、水库区的大、中比例尺地形测图测绘，水库实物指标调查测绘，天然建筑材料料场地形图测绘等，并为工程地质调查提供各种测绘资料。③可行性研究阶段测量。主要进行水电站枢纽区和选定天然建筑材料料场的大比例尺地形图测绘、水库淹没界线与浸没区测定、工程建设征地、移民安置工程、专项复建工程、施工临时工程、道路工程等项目测量。对于在不良地质条件的地区进行工程建设还要对地层稳定性进行观测。④招标设计阶段测量。主要是为水工建筑物进行大比例尺地形图测绘或专项工程勘察补充测量。⑤施工阶段测量。根据设计的施工总体布置图、建筑物设计图及有关文件的要求，布设施工平面和高程控制网，进行建筑物施工放样、测量监理、竣工测量，并完成施工过程中的变形观测等。⑥运行期测量。主要包括工程竣工后的安全运行和水库淤积等所进行的长期重复观测，研究建筑物和地壳的位移、沉降、倾斜、裂缝和水库淤积状况，判断建筑物的稳定性、水库运行调度和水库区的崩塌、滑坡及水库地震预报等。

简史 远古时期为战胜洪水与兴修水利人们就开始应用测量手段获取资料。古埃及因尼罗河洪水泛滥，为退水后重划地界而进行测量。中国相传大禹治水时就应用了测量技术，在《史记・夏本纪》中载有“左准绳，右规矩”之说。北宋时曾有人用分级筑堰静水水位法测量汴渠 400 多千米长的沿河高差，用水平望尺、杆尺和罗盘测量地形，并最早发现磁偏角。随着社会发展的需要，工程建设的规模越来越大，对工程测量提出了新要求，促进了工程测量新技术的应用，推动了工程测量理论、技术和方法的完善和成熟，由使用简单工具发展为应用精密仪器。19 世纪 50 年代出现应用地面摄影测量方法编制地形图，20 世纪初出现航空摄影测量，60 年代由于航天遥感技术、惯性测量技术、自动安平技术、电磁波测距和电子计算机技术的发展，出现了自动安平水准仪、光电测距仪、解析测图仪和计算机辅助测图系统等，使工程测量技术有了明显的进步。特别是在 80 年代以后，由于微电子学、光电技术、空间技术、编码技术、图像处理技术及计算机科学技术的迅速发展，出现了全站仪、数字水准仪、数字摄影测量系统、全球导航卫星系统（GNSS）、遥感（RS）、地理信息系统（GIS）等，促使传统的测绘学理论、技术和方法的变革，拓宽了研究对象和解决问题的领域。为资源开发和工程建设提供的资料远远超出了传统的范围，从单一的线划地形图变为数字线划地形图（DLG）、数字栅格地形图（DRG）、数字正射影像图（DOM）、数字高程模型（DEM）等 4D 产品，供规划设计人员进行计算机辅助设计（CAD）使用；除提供地面几何信息外还可提供一定的物理和社会经济信息。

参考书目

李青岳，陈永奇．工程测量学．北京：测绘出版社，1995.

gongcheng celiang yiqi

工程测量仪器 (engineering surveying instrument)

工程建设的规划设计、施工及运营管理阶段进行测量工作所需用的各种定向、测距、测角、测高、测图以及摄影测量等方面的仪器。按其功能，分为通用仪器和专用仪器。

通用仪器 主要有全站仪、水准仪、全球导航卫星系统（global navigation satellite system，GNSS）、经纬仪、测距仪、三维激光扫描系统、数字摄影测量系统等。

全站仪 即全站型电子速测仪（electronic total station），是一种由电子测角、电子测距、电子计算和数据存储单元等组成的光机电一体的三维坐标测量系统，集成水平角测量、垂直角测量、距离（斜距、平距）测量、高差测量、电子计算、数据存储等多项功能，测量结果能自动显示，并能与外围设备交换信息的多功能测量仪器，见图。全站仪一次安置就可完成测站全部测量工作，广泛用于大地测量、地籍测量、地形测量、线路测量、断面测量、线路测量、控制测量、施工测量、变形监测等领域。全站仪按外观结构可分为组合型（积木式）全站仪、整体式全站仪两类，按测量功能分成经典型（常规）全站仪、机动型全站仪、无合作目标性全站仪和智能型全站仪 4 类，按测距分为短距离测距全站仪、中测程全站仪和长测程全站仪 3 类，按测角精度可分为 0.5″、1″、2″、3″、5″、10″等几个等级，按应用领域可分为工程全站仪（主要用于一般工程测量、施工测量、地籍测量等）、精密全站仪（主要用于精密工程测量、变形监测等）两类。



全站仪

水准仪 根据水准测量原理测量地面两点间高差的仪器，主要由望远镜、管水准器（或补偿器）、垂直轴、基座、脚螺旋等部件组成。水准仪按精度分为精密水准仪和普通水准仪两类，按结构分为微倾水准仪、自动安平水准仪、激光水准仪和数字水准仪（又称电子水准仪）。中国光学水准仪分级系列有 DS05、DS3、DS10、DS20 等，“D”“S”分别为“大地测量”“水准仪”的汉语拼音第一个字母，05～20 为以毫米为单位的每千米偶然中误差。

（1）微倾水准仪。借助微倾螺旋获得水平视线。望远镜与管水准器联结成一体，凭借微倾螺旋使管水准器在竖直面内微作俯仰，符合水准器居中，视线水平。

（2）自动安平水准仪。借助自动安平补偿器获得水平视

线。当望远镜视线有微量倾斜时，补偿器在重力作用下对望远镜作相对移动，从而迅速获得视线水平时的标尺读数。这种仪器较微倾水准仪工效高、精度稳定。

（3）激光水准仪。利用激光束代替人工读数。将激光器发出的激光束导入望远镜筒内使其沿视准轴方向射出水平激光束，并在水准标尺上配备能自动跟踪的光电接收靶，即可迅速获得视线水平时的标尺读数。

（4）数字水准仪。又称电子水准仪，是在自动安平水准仪的基础上发展起来的集光机电、计算机和图像处理等技术为一体的水准测量仪器。采用条码标尺，标尺条码照准后，一方面被成像在望远镜分化板上，供目视观测；另一方面通过望远镜的分光镜，标尺条码又被成像在光电传感器（又称探测器）上，即线阵 CCD 器件上，通过内置计算机比对迅速获得视线水平时的标尺读数。较传统光学水准仪减少了人工读数误差，电子读数原理包括相关法、几何法、相位法 3 类。

GNSS　全球导航卫星系统或全球卫星导航系统（global navigation satellite system），即利用空中分布的导航定位卫星，在全球范围内实时进行定位、导航的系统。GNSS 的基本原理是测量出已知位置的多颗卫星到用户接收机之间的距离，然后综合多颗卫星的数据就可计算确定接收机的具体位置。由于 GNSS 系统是以卫星为基础的无线电导航定位系统，具有全能性、全球性、全天候、连续性和实时性作业的特点，主要应用空间位置服务（定位、导航和测量）和时间服务（系统时间同步和授时）两大基本服务。GNSS 系统包括三大部分：空间部分——GNSS 卫星星座、地面控制站部分——地面监控系统、用户设备部分——GNSS 接收机。全球主要有四大导航卫星系统：美国的全球定位系统（global positioning system，GPS）、俄罗斯“格洛纳斯”全球卫星导航系统（GLONASS）、欧盟的伽利略定位系统（Galileo，Galileo Positioning System）和中国的北斗导航卫星系统（COMPASS，BeiDou Navigation Satellite System）。

GNSS 接收机是接收全球导航卫星系统卫星信号并确定地面空间位置的仪器。按接收机的用途分为导航型接收机、测地型接收机两类，按接收机的载波频率分为单频接收机、双频接收机、多频接收机 3 类，按接收机所具有的通道种类可分为多通道接收机、序贯通道接收机、多路多用通道接收机 3 类，按接收机工作原理分为码相关型接收机、平方型接收机、混合型接收机、干涉型接收机 4 类。

经纬仪　主要用于测量水平角和竖（垂）直角的仪器，其十字丝装置可进行低精度的距离测量。中国生产的经纬仪分级系列有 DJ07、DJ1、DJ2、DJ6、DJ15、DJ60。“D”“J”分别为“大地测量”“经纬仪”的汉语拼音的第一个字母，07～60 为以秒表示的一测回水平方向中的误差。经纬仪已很少使用。

测距仪　根据光学、声学和电磁波学原理设计的测量距离的仪器，又称电磁波测距仪。测距仪根据测距基本原理可分为激光测距仪、超声波测距仪、红外测距仪 3 类，按测程分为短距离测距仪、中测程测距仪、长测程测距仪 3 类。

三维激光扫描系统　利用三维激光扫描技术（包括测角与激光测距原理），快速获取空间点云数据（三维坐标值）的测量仪器和后处理软件（可快速建立结构复杂、不规则的场景的三维可视化模型）的软硬件系统的总称，其测量原理为空间极坐标法。三维激光扫描测量技术（light detection and ranging，LiDAR）是一种全自动高精度立体扫描技术，又称为实景复制技术，它突破了传统测量单点测量技术的局限性，采用非接触主动测量面阵测量方式直接获取高精度三维数据方法，能够对任意物体进行扫描，且没有白天和黑夜的限制，快速将现实世界的信息转换成可以处理的数据，用于获取高精度高分辨率的数字地形模型。三维激光扫描测量系统具有扫描速度快、实时性强、精度高、主动性强、全数字特征、适应性强等特点，可以大幅降低成本，节约时间，而且使用方便，成果输出格式多样，与 CAD、GIS 等软件有通用数据转换接口。三维激光扫描系统按工作原理分为脉冲式扫描系统、相位式扫描系统、三角法扫描系统 3 类，按扫描系统运行平台分为机载（星载）型激光扫描系统、地面固定型激光扫描系统、地面移动型激光扫描系统、手持型便携式激光扫描系统 4 类，按扫描测程分为微距三维激光扫描系统（＜1m）、短测程三维激光扫描系统（1～100m）、中测程三维激光扫描系统（100～500m）、长测程三维激光扫描系统（500～2000m）和超长测程三维激光扫描系统（＞2000m）5 类，按扫描激光类型分类近红外三维激光扫描系统、绿色三维激光扫描系统两类。

数字摄影测量系统　基于数字影像和摄影测量的基本原理，应用计算机技术、数字影像处理、影像匹配、模式识别等多学科的理论与方法，提取所摄对象以数字方式表达的几何与物理信息的摄影测量软硬件系统。数字摄影测量系统主要处理过程包括空中三角测量、内定向、相对定向、绝对定向、数字地面模型生成（数值地形模型产生）、正射影像生成、等高线测绘和地物测绘编辑。

专用仪器　主要有坡面经纬仪、激光经纬仪、激光铅垂仪、激光准直仪、陀螺全站仪、垂线观测坐标仪、引张线、激光准直系统、静力水准仪等。

坡面经纬仪　工程经纬仪上附加副望远镜构成的仪器。用于倾斜巷道标定腰线、土石坝边坡放样与削坡、土方的验收等。在线路测量中满足控制线型的曲率和纵向坡度，相邻两个变坡间挖填高度可在现场比较，是施工放样中较方便的仪器。

激光经纬仪　用于定线、定位、测量已知角度和坡度等的放样仪器。

激光铅垂仪　用于高层建筑的滑模施工、摆动观测和竖井的掘进导向等的仪器。

激光准直仪　用于挖渠、敷设管道等直线性精密定线和变形观测的仪器。

陀螺全站仪　由陀螺仪和全站仪结合一体的仪器，通过高速回转体的内置陀螺进行真北方向的准确定位，测定目标真方位角。常用于矿山、地下洞室、隧道等测量。

垂线观测坐标仪　测定垂线中心平面坐标的一种仪器。常用于正（倒）锤线观测，测定建筑物的水平位移。

引张线　用拉紧的金属丝作为基线，以测定建筑物水平位移的设备。由引张线、重锤、浮托等组成。装置光电跟踪设备，可进行自动位移观测。

激光准直系统　将激光束作为定向发射而在空间形成的

一条光束作为准直的基准线，以标定直线的一种工程测量仪器，主要用于工程变形监测。激光准直系统由发射系统（激光器作为光源）、光电接收系统及附件三大部分组成。激光准直系统分为空气激光准直系统和真空激光准直系统两类。

静力水准仪　静力水准仪是一种高精密液位测量系统，主要用于测量多点的相对沉降监测。使用将多个静力水准仪的容器用通液管连接，每一容器的液位由磁致伸缩式传感器测出，传感器的浮子位置随液位的变化而同步变化，由此测出各测点相对于叫基准点的液位变化量，从而精确计算出静力水准仪系统各测点的沉降变化量。静力水准仪包括振弦式、电阻式、液位式等类型。

gongcheng dizhi cehui

工程地质测绘　(engineering geological mapping)

对工程场区各种地质现象进行观察、量测和描述，并标识在地形图上的地质工作。通过工程地质测绘可以了解工作区的地质环境，发现与工程建筑有关的地质问题，为进一步调查、勘探及试验等专门研究提供条件。工程地质测绘工作一般分准备工作、野外测绘及内业整理3个阶段。

准备工作　包括：①全面搜集测绘区有关的地形地质地貌、航片、卫片及气象等资料。②按勘察阶段，工程特性及地形、地质复杂程度等确定测绘范围和比例尺。③查勘现场后编制测绘大纲。

野外测绘　主要内容有地层岩性、地质构造、地貌、物理地质现象、水文地质等方面。①地层岩性。包括岩石种类及名称、地层年代、层序与接触关系、岩性特征及分布、岩层厚度，岩石组成物性质、结构及其变化规律。注意其中的软岩、可溶岩及其夹层，如火山岩喷发间歇风化层，蚀变带，滑石、石墨及绿泥石片岩，以及第四纪岩层中的软土、膨胀土、湿陷性黄土、粉细砂、架空的砂砾石层等的分布。②地质构造。包括褶皱的形态及分布，断层的规模、分布、产状、断距、错动痕迹及第四纪活动迹象，不同岩性和构造部位裂隙发育程度及规律。③地貌。包括河谷断面、岸坡、阶地、冲沟、洼地、河间地块及分水岭等。④物理地质现象。包括岩溶、滑坡、崩塌、泥石流、风化、卸荷等的分布、规模、成因和发展趋势。⑤水文地质。包括井泉等地下水露头的分布、补给条件，水位、水质、水温、水量及其随季节的变化规律等。

野外测绘根据测区的地质、地形及交通条件布置测线和观测点，选择典型剖面编制地层或岩层柱状图，按测绘比例尺确定地层划分单位。水电工程地质测绘的比例尺分大、中、小3类，即大于等于1∶5000、1∶10 000～1∶50 000、小于1∶50 000。小比例尺测绘多用已有资料或遥感地质资料结合现场重点校核、补充测绘，测绘用的地形底图等于或大于地质图的比例尺，并以选用近期航片绘制的为好。大比例尺测绘的地质点应采用仪器定位，中、小比例尺测绘可采用目测、罗盘交汇或手持GPS定位，对控制性及重要地质点应采用仪器定位。在测绘过程中要随时整理记录和绘制草图。

内业整理　包括：①清理标本、地质照片、录像等，填写标签和说明后配套保存。②整理地质点记录和素描图、照片、录像等。③编制各种汇总表。④编制地质平面及剖面图。⑤编写测绘说明书或报告。

gongcheng dizhi guance

工程地质观测　(engineering geologic monitoring)

工程地质勘察期间，定期或不定期观测工程建筑物地基、围岩、边坡工况和有关不良地质现象变化过程的工作。一般以简易观测为主。水电工程地质勘察期间，除进行常规地质勘探和试验研究外，有时需要较长期的观测不良地质现象及其有关因素的动态和变化规律，以便及时采取防护和处理措施。观测期间，应及时整理观测资料，为工程地质问题分析提供依据。针对不同工程地质问题，观测的内容和方法不同。

观测内容　包括：①水库及绕坝渗漏可疑地段或通道的地下水动态。②施工期地下洞室围岩变形、地下水渗透压力及渗流量等。③岸坡滑塌体和蠕变岩体的位移量、裂缝数量和宽度的变化。④库岸、边坡及坝下游浸没、塌岸、沼泽化、盐碱化及黄土湿陷范围的变化。⑤蓄水初期库岸或建筑物明显变形位移等。

观测方法　主要包括地下水动态观测，岸坡岩体的变位观测，地下洞室围岩变形和应力观测，浸没、盐碱化、沼泽化、黄土湿陷及冲刷情况的监测、预测，活断层位移量观测。

(1) 地下水动态观测。利用简便的设备定期观测或用仪器自动、连续记录所观测的钻孔地下水位和井、泉等地下水点的水位、流量、水温等，并定期取样测试水化学成分。要同步观测或搜集与其有关的气象水文资料，供进行系统的水文地质分析时使用。

(2) 岸坡岩体的变位观测。①在变位的或可能变位的岩（土）体表面设观测剖面或观测网，定期用测量仪器量测。②在变位岩土体上的钻孔或探洞内，装置倾斜仪或挠度计，定期量测滑体的各向位移量，同时也可在滑体的拉裂缝上，装设缝隙监测器，定时观测其3个方向的位移量。③利用遥感技术监测滑动体的整体位移。④利用地下噪声监测仪，监听岩土体在应力作用下产生的次声波，预报岩体变形活动情况。该监测仪可在钻孔中埋设，能承受一定的静水压力。

(3) 地下洞室围岩变形和应力观测。地下洞室围岩变形常用的有两种方法：①在选定断面的顶拱及边墙上埋设固定点，随洞室的掘进定时量测两点的相对变形。②将多点位移计埋在洞顶及洞壁上的径向钻孔内，孔底设固定点，随洞室的开挖定时观测孔内各测点与固定点的相对位移。钻孔深度根据岩体变形影响范围确定。孔内的测点数，各种仪器不完全相同，最多可埋8个点。仪器最好在洞室开挖前，或在掌子面附近埋设，尽可能测到完全变形量。

洞室围岩应力观测是在围岩内及围岩与支护之间埋设液压应力计，随洞室开挖监视岩体应力的变化。观测断面上的压力计一般是成双或成组埋设，以求得各方向的应力变化值。

(4) 浸没、盐碱化、沼泽化、黄土湿陷及冲刷情况的监测、预测。除观测地下水动态外，还以重复测量的方法，监视其变化范围。

(5) 活断层位移量观测。收集大地形变和断层带的相对垂直和水平位移资料并进行分析。

观测成果　观测成果的可靠性与准确性取决于观测点的代表性、观测时间的适时及系列长短、记录是否准确无误。观测前要根据地质条件选好观测网点的位置，按时观测，及时整理记录，消除人为或仪器设备的误差，编绘观测项目与时间的关系曲线，保证准确及时预测有关的工程地质问题。必要时编写专项工程地质观测报告。

gongcheng dizhi kancha

工程地质勘察　(engineering geological investigation)

为查明工程建筑物区地质条件所进行的地质调查研究工作。由于建筑物类型、规模及重要性不同，对地质条件要求也不同。在水电工程建设之前，要进行区域、水库区、坝址区以及各水工建筑物区的工程地质勘察，调查它们的工程地质条件，研究各种建筑物对地质条件的适应性及在兴建中可能出现的问题以及处理意见，调查天然建筑材料（如混凝土骨料、土坝和堆石坝的土料和石料、防渗土料等），为工程设计、施工提供地质资料和评价。目的是选择在地质条件上相对优越的工程场地或建筑区；阐明工程场址和建筑区的地质环境、工程地质条件及岩石、土壤的物理力学性质，进行定性和定量的工程地质评价；预测工程建筑物兴建和运用过程中地质条件的可能变化，为研究改善和防治不良工程地质条件的措施设计提供依据；评价工程建筑物所需天然建筑材料的储量、质量等。

勘察任务和内容　水电工程地质勘察分河流规划、预可行性研究、可行性研究、招标设计、施工详图5个阶段。

(1) 规划阶段勘察。任务是了解和分析各梯级开发方案的工程地质条件，对近期开发工程选择和控制性工程进行地质论证和提供地质资料。内容包括了解规划河流或河段区域地质和地震概况；了解各梯级水库的工程地质条件和主要工程地质问题，分析成库条件；了解各梯级坝址的工程地质条件和主要工程地质问题，分析建坝条件；了解引水线路及厂址的工程地质条件；对各梯级坝址附件所需的天然建筑材料进行普查。

(2) 预可行性研究阶段勘察。任务是在规划阶段勘察的基础上，初选代表性坝（闸）址，并应对代表性坝（闸）址、代表性枢纽布置方案进行工程地质初步评价与提供地质资料。内容包括区域构造稳定性研究及地震安全性作出评价；初步查明水库区的主要工程地质条件，并对影响方案成立的主要工程地质问题做出初步评价；初步查明坝（闸）址、引水线路、厂址和泄洪设施等建筑物场地的主要工程地质条件，并对影响方案成立的重大工程地质问题和代表性坝址、枢纽布置方案的主要工程地质条件作出初步评价；对代表性坝型所需天然建筑材料进行初查。

(3) 可行性研究阶段勘察。任务是在预可研阶段勘察工作的基础上，查明水库区、坝址区的工程地质条件，为选定坝址、坝型、坝线及枢纽布置提供地质依据；对选定坝址各建筑物的工程地质条件、主要工程地质问题进行论证和评价，提供设计所需的工程地质资料。内容包括根据需要复核和补充区域构造稳定性评价；查明水库区工程地质条件，分析工程地质问题，预测蓄水后变化；查明坝址工程地质条件和影响坝址比选的主要工程地质问题，为选定坝址进行论证；查明选定坝址建筑物区的工程地质条件并进行评价，为选定坝型、坝轴线及地基、边坡、围岩处理等方案设计提供地质资料和建议；查明导流工程、弃渣场、缆机平台等主要临时建筑物的工程地质条件和作出评价；进行天然建筑材料详查；进行地下水动态观测和岩土体位移监测；查明水库移民集中安置区和专项复建工程地质条件，评价拟建场地的稳定性和适宜性；进行建设用地地质灾害危险性评估。

(4) 招标设计阶段勘察。任务是在审查批准的可行性研究勘察报告基础上进行，复核可行性研究阶段的地质资料与结论，补充查明遗留工程地质问题，为完善和优化设计与编制招标设计文件提供地质资料。内容包括复核可研阶段勘察成果；补充查明遗留工程地质问题；论证审批中提出的专门性工程地质问题；提供与优化设计有关地质资料；初步查明各临时和辅助建筑物的工程地质条件并作出评价，复核或补充查明水库移民集中安置区与专项复建工程的工程地质条件并作出评价。

(5) 施工详图设计阶段勘察。任务是在招标设计阶段勘察工作基础上，检验、核定前期勘察的地质成果与结论，补充论证专门性工程地质问题，为设计提供地质资料。内容包括对招标设计评审中要求补充论证和建筑物施工、水库蓄水初期出现的专门性工程地质问题进行勘察；开展施工地质工作，检验、核定前期勘察成果与地质编录；提出施工中工程地质问题处理措施地质建议；分析施工期地质监测和建基岩体检测资料，提出有关完善施工期和运行期检测、监测布置与技术要求的地质建议。必要时进行天然建筑材料复查。

勘察方法　主要有工程地质测绘、勘探、工程地质试验与水文地质试验、长期观测和监测等。按照由区域到场地，由地表到地下，由一般性调查到专门性问题研究，由定性到定量的原则进行。一般先进行地质测绘而后按顺序开展勘探、试验及长期观测和监测工作。测绘是先作小比例尺的后进行大比例尺的。勘探一般是先做物探，在此基础上再布置钻探和坑探。岩土试验是先以室内工作为主，而后进行必要的室外大型试验。长期观测和监测一般是在可研阶段及以后的阶段中进行。

(1) 工程地质测绘。可全面了解工作区的基本地质条件，为合理布置勘探工作提供依据，是勘察工作的基本方法。依托区域地质资料开展内、外业工作，结合卫片、航片、陆摄像片等遥感地质解释资料进行制图。

(2) 物探。可探测覆盖层厚度，岩体风化深度，隐伏断裂带、滑坡、岩溶及地下水埋藏深度，不同物理性质的岩层界面、岩土物理力学参数，以及了解洞室围岩和坝基岩体松动范围，检查建基岩体质量、孔壁构造与岩溶洞隙、灌浆效果等，是一种快捷、轻便的勘探方法。

(3) 钻探。可查明地下一定深度的岩体、断裂、岩溶及地下水等情况，是勘察工作的主要手段。大口径钻探已成为探查软弱夹层和缓倾角断裂的有效手段。

(4) 坑探。多用于探查河谷岸坡地表与地下的工程地质条件及风化卸荷带、断裂与软弱夹层、岩溶通道系统等专门地质问题。其中竖井、平洞可作为岩体原位测试的场地。

(5) 工程地质试验。包括室内、外的岩（土）体物理力学试验、变形试验、强度试验及岩体应力测试等方面，为评价工程地质条件以及设计、施工提供参数。

(6) 水文地质试验。主要包括测定岩（土）体渗透性参

数的抽水试验、压水试验、注水试验以及地下水流速、流向试验等。为设计和研究防渗措施提供基本依据。

（7）长期观测和监测。验证地质评价和预测的准确性，研究某些专门地质问题的重要方法，如地下水动态观测，岸坡变形、地基沉陷监测等。

勘察成果　各阶段勘察工作结束后，提交工程地质勘察报告，报告由正文、附图及附件等组成。

gongcheng dizhi kengtan

工程地质坑探　（engineering geological pitting）

为地质调查而在地表或地下挖掘的各种不同类型槽、坑、井及坑道工程的总称，或称山地勘探。通过坑探勘探可以直接观察和描述地层岩性、地质构造、风化程度、卸荷程度、地下水状态及岩溶发育程度等，还可进行现场取样、岩体物理力学原位试验和设置观测点，为设计人员、科研试验等提供工作条件。

坑探类型　按其所在位置与地面的关系，可分为地表坑槽和地下坑道两类。

（1）地表坑槽。在地面浅表层实施的探槽、探坑及浅井坑探的开挖。①探槽。在地表浅层挖掘的长条型沟槽，其长度、宽度取决于地质要求，深度一般不超过3m，用于揭露浅表层覆盖层厚度勘探和取样。②探坑。从地表向下开挖，断面呈方形或圆形，深度一般小于3m，用于地表缓坡地带勘探和取样。③浅井。从地表向下挖掘，断面呈方形或圆形，深度介于3～10m间，断面及尺寸按地质要求、深度一般不大，用于地下较深部位岩土体勘探和取样。

（2）地下坑道。在地面以下一定深度或从地表向下深度超过10m的平洞、竖井或斜井坑探的开挖。①平洞。通常与地面相通，掘进于山体内的近于水平的地下坑道。其断面多呈拱形或方形，断面尺寸视深度和地质要求而定，一般为1.8m×1.8m～3m×3m，适用于深部岩土体勘探、取样及试验。为了勘察需要，有时需将平洞穿过河床挖掘，此类平洞称之为河底平洞或过河平洞。②竖井。沿铅直方向向下挖掘的深井，竖井断面多为方形或圆形，掘进深度超过10m，断面尺寸视地质要求而定，一般为2m×2m～4m×4m。适用于深厚覆盖层区或地层结构复杂的平缓岩层区勘探和取样。③斜井。坑道中心线与水平面成一定夹角的竖井。

技术要求　包括探槽、探坑、浅井施工，平洞施工及竖井、斜井施工。水电工程坑探施工中，除应及时支护外，应重视涌水、排水、岩爆等预防处理及有害气体探测，确保施工和使用期间的作业安全，使用之后应及时回填、封堵等处理。

（1）探槽、探坑、浅井施工。探槽和探坑均采用人工开挖、出渣的方法施工，其断面小、深度浅，一般不需进行支护。浅井由于地层松散，井壁稳定性差，应进行必要的支护。在施工结束、收集完成地质资料后需及时回填处理。

（2）平洞施工。平洞多在地下深部的岩体中掘进，一般采用机械作业方法施工，包括凿岩、爆破、出渣、支护，以及通风、防尘、排水及洞壁清洗等工序。过河平洞施工前应收集河床地形及水文和地质资料，编制施工组织及应急救援预案，施工中加强对洞内涌水点的监测和准备排水措施，施工结束、收集完成地质资料后及时封堵洞口。

（3）竖井、斜井施工。竖井井口浅表部岩土体较为疏松，可采用人工开挖施工；深部则需采用凿岩爆破和机械提升出渣方法施工。施工中应及时对井壁四周进行支护和排水处理。斜井的开挖出渣通常采用轨道卷扬机出渣，对洞壁的支护更为复杂。

gongcheng dizhi pingjia

工程地质评价　（engineering geological evaluation）

结合勘测成果，通过全面分析工程地质环境与工程地质条件，对工程建筑物的区域构造稳定性及相关工程地质问题所作的估计。工程地质评价需结合建筑物的具体要求和勘察工作深度进行，一般定性和定量评价并重，随着工作的深入，逐步提高定量评价的精度。水电工程地质评价分为：区域构造稳定性评价、渗漏问题评价、岩溶渗漏问题评价、坝基抗滑稳定问题评价、地震液化问题评价、渗透稳定问题评价、地下建筑物围岩稳定问题评价、边坡稳定问题评价、天然建筑材料评价等。

区域构造稳定性评价　对水工建筑物在未来运行期间可能遭受到的地质构造和地震的影响所作的估计。收集坝址周围不小于150km范围内区域的地质、地震资料，初步分析坝址周围地区的区域构造稳定性。

活断层的研究　研究坝址区附近区域性断层的活动性，确定活断层（晚更新世或10万年以来有过活动的断层）的分布与活动年代。坝址尽量避开具活动断层及其分支断层。工程建筑物原则上不布置在活断层上。对活断层的危险性根据其性质、规模、活动的强度和频度进行估计。

地震安全性评价　包括区域地震构造环境评价、近场区地震地震环境综合评价、地震活动性分析评价、地震危险性分析结果、工程场地地震动参数确定等内容。由具备地震安全性评价资质的单位来承担，并应经相应的地震主管部门批复同意。

水库地震　预测地震的性质、地点和强度。构造型水库地震一般发生在构造应力集中部位，可用库区构造地震的可能震级上限作为其震级上限，或用断层破裂长度统计法估算震级上限。可溶岩地区水库地震多发生在岩溶发育地段，其震级上限一般用地质地震类比法估计。

渗漏问题评价　包括渗漏边界条件及渗漏量计算。

渗漏边界条件　一般在邻谷低于水库水位、水库与邻谷或下游间存在低于库水位的地下水分水岭或库底无隔水层时发生水库渗漏。需要调查古河床（道）、强透水岩层、大断层等强透水带与库水接触的范围、强透水带的分布、性质、透水性、在邻谷或下游出露的位置和高程。水库与下游间存在单薄山体时需进行与强透水带调查内容相似的调查工作，特别是单薄山体与库水接触范围和山体的透水性。

渗漏量计算　根据调查所得的渗漏范围、渗透比降、渗径、各类岩土体的渗透系数，利用地下水动力学方法计算渗漏量。岩体中裂隙水与土体中孔隙水的运动状态不同，要根据情况选用适宜的计算方法。也可采用不同的电模拟方法求取渗漏量。

水电工程渗漏问题的评价中比较突出的是岩溶渗漏问题评价。

岩溶渗漏问题评价　岩溶渗漏是指库水通过岩溶通道向

邻谷和下游的渗漏以及通过坝基和绕坝的渗漏。一般依据该地区的基本地质条件进行评价，这些条件有：①隔水层或相对隔水层的空间分布、厚度。②地下水和河水的补排关系，地下水分水岭的位置、高程和水动力条件。③岩溶的发育规律、发育强度、岩溶洞穴系统的规模、空间分布、连通和充填情况等。

不具备渗漏的地质条件　包括：①邻谷的河水位高于水库蓄水位（悬挂于地下水位以上的河流不属于此种情况）。②水库周边有连续、稳定、可靠的相对隔水层或隔水层，且分布高程高于水库蓄水位。③河间地块存在高于水库蓄水位的地下水分水岭（存在多个岩溶含水层时，各层的地下水位都高于水库蓄水位）。

具备渗漏的地质条件　包括：①水库蓄水位高于邻谷河水位，河间地块岩溶发育，地下水分水岭低于水库蓄水位或没有地下水分水岭，没有可靠隔水层或相对隔水层阻隔，或隔水层已受构造破坏。②坝址上、下游河流流量反常或河水补给地下水。③下游河床有较大落差，与坝址之间无隔水层或隔水层已被破坏，且岩溶发育。

岩溶渗漏量的计算　通常按渗漏性质选择估算方法。岩溶渗漏可分解为岩溶裂隙性渗漏和集中管道渗漏，分别计算渗漏量的总和即为岩溶渗漏量。岩溶裂隙性渗漏采用均化的渗透系数按一般岩体渗漏量计算方法估算；集中管道渗漏可采用水量均衡法、类比法、水力学管道流公式计算。

坝基抗滑稳定问题评价　包括分析坝基滑移的边界条件、确定计算参数和进行稳定核算。

滑移边界条件　指滑移面、侧向切割面和临空面。滑移面多为倾角小于30°的软弱结构面。侧向切割面是可与滑移面组合构成滑移体的各种中、陡倾角结构面。临空面是坝下游可供滑移体自由滑移的空间，如地形上的沟谷、溢流冲刷坑或易于压缩变形的断层带和软弱岩层等。按照滑移面的位置，坝基滑移破坏分为沿坝体混凝土与岩土体接触面的滑移；沿坝体混凝土与岩土体接触面附近的软弱面破坏的浅层滑移；沿一定深度处的软弱面破坏的深层滑移等。滑移边界有以下几种组合情况：①倾向下游的缓倾角滑移面、侧向切割面与下游临空面的组合；②倾向下游的缓倾角滑移面、侧向切割面与坝趾附近倾向上游的缓、中倾角结构面的组合；③倾向上游的缓倾角滑移面、侧向切割面和坝踵附近横河向的上游切割面的组合；④拱坝坝肩岩体内平缓倾角滑移面、侧向切割面与下游临空面的组合等。

计算参数的确定　滑移面和侧向切割面的抗剪（断）强度参数可选用抗剪试验峰值强度的小值平均值为标准值，并考虑试验的代表性、滑移面和侧向切割面的起伏程度、夹泥的厚度、性状及时间效应、水库蓄水后地质条件恶化的影响、基坑开挖形态和地基处理效果等因素作适当调整。

地震液化问题评价　土在静力或动力作用下由固体状态转化为液体状态的过程称为土体液化。如果产生了工程中不允许的变形量，则称为液化破坏，主要表现为孔隙压力上升，抗剪强度（或剪切刚度）降低并趋于消失，引起的喷水冒砂、丧失承载能力或发生流动性变形。

容易液化的土　地震时常见的发生液化破坏的土为黏粒（粒径小于0.005mm）含量小于15%（少数可达20%）的饱和土。其中主要是饱和无黏性土（塑性指数$I_p<3$）和少黏性土（塑性指数$I_p\geqslant3$），包括黏粒含量小于3%的饱和砂、粉砂、粉土和黏粒含量大于3%的饱和砂壤土、粉质砂壤土、轻粉质砂壤土。

土层液化的判别　在勘察过程中分为初判和复判两个阶段。初判主要根据已有资料或通过较简单的测试，通常认为第四纪晚更新世（Q_3）或以前的土层，可判为不液化的。复判是在初判基础上对可能发生液化的土层再作进一步鉴定，一般采用标准贯入试验锤击数、相对密度和相对含水量及液性指数等为标准作判定，或进行专门性试验研究。

渗透稳定问题评价　渗透变形是土体在渗流作用下发生破坏的统称，一般可分为管涌、流土、接触流失和接触冲刷4类。以抗渗允许比降作为判别的标准。

地下建筑物围岩稳定问题评价　基本上可分理论分析法与围岩分类法两大类。

理论分析法　在查明地下建筑物地质条件的基础上，依据岩体力学属性的不同，分别采用与之相适应的理论与方法对围岩的稳定性和岩石压力做出评价。当围岩为比较完整的坚硬岩体，特别是埋深较大时，采用弹性理论或弹塑性理论方法。当围岩有多组贯穿性结构面切割，呈不稳定块体时，采用极限平衡理论方法。当围岩为破碎岩体或松散土体时，采用散体理论方法。计算中所需的岩体物理力学参数如密度、变形模量、抗剪强度、地应力及地下水位等，在不同设计阶段分别以工程类比法或试验室及现场测试确定。

围岩分类法　随着喷锚支护同时发展起来的一种评价方法。它是根据工程实践所形成的围岩分类表对围岩的基本因素逐项进行评分，最终以总评分确定围岩类别。国际上使用较广的有Q系统分类（Q-SYSTEM）和地质力学分类（RMR-SYSTEM）。中国水电工程围岩分类按5级制，类别和稳定性评价即为：Ⅰ类（稳定）、Ⅱ类（基本稳定）、Ⅲ类（局部稳定性差）、Ⅳ类（不稳定）、Ⅴ类（极不稳定），分类考虑的基本因素是岩石强度、岩体完整程度、结构面状态及其走向和建筑物轴线间的夹角、地下水和地应力等，通常需做一些现场测试工作。在河流规划和预可行性研究阶段地质资料较少时，可根据岩石强度、岩体完整程度、岩体结构等对围岩定性地作初步分类评价。

边坡稳定问题评价　包括进行边坡分区（段）、明确可能失稳边坡的边界条件和边坡稳定性分析。

边坡分区（段）　区分出需进一步研究的可能失稳地段，如：①软弱岩层组成的、风化或卸荷深度大的、坡脚存在软弱岩层（易风化、易崩解的泥岩、已有煤矿在开采的煤系地层等）的高陡边坡。②已有变位迹象（拉裂缝、小错台、岩层产状非构造性异常、岩体蠕变现象等）的边坡。③位于河流凹岸处的顺向坡，受河流冲蚀、水库回水、渠道渗水等影响的高土质坡和老滑坡。④植被近期被大量破坏的土质陡坡。⑤倾向坡外、倾角小于边坡坡度的软弱结构面发育的边坡。⑥存在由结构面组合切割形成的向坡外滑移的不稳定岩体的边坡等。

边坡的滑动边界条件　除临空面外包括滑动面和侧向切割面，重点是研究其延伸情况、组合及其性状。滑动面一般都取样作室内抗剪试验，影响重大的滑坡体还进行现

场抗剪试验。

边坡稳定性分析　有历史分析法、力学验算法、工程地质类比法等，一般常进行相互验证。①历史分析法是应用边坡变形、破坏规律推断边坡目前所处的演变阶段、演变的主导因素、发展趋势、变形和破坏方式。②力学验算法是应用岩石力学或土力学的理论和方法，分析计算边坡在给定条件下的稳定性，一般采用刚体极限平衡法，必要时应采取有限元等计算方法进行复核分析。计算剖面的位置和采用的参数对成果影响较大，需仔细选择。通常，抗剪强度均在试验资料的基础上，结合具体地质情况作一定调整，以具备充分的代表性。另外，稳定性评价时要根据边坡失稳后的影响大小和对边坡地质条件的了解程度选用不同的安全系数值。③工程地质类比法是采用较广的一种方法。使用中需注意的是类比工程的各方面相似性越高，所得结果也越可靠。

天然建筑材料评价　天然建筑材料包括水电工程建设所需的砂砾料、土料和石料。天然建筑材料勘察级别划分为普查、初查和详查。

普查　宜在规划场地 40km 范围内进行，调查了解料源的分布、种类、质量，估算其储量。

初查　初步查明砂砾料、土料的组成、厚度、地下水位、夹层和无用层厚度等；石料应初步查明料源岩性、矿化成分、风化带、无用层及喀斯特洞隙发育等。对各料场料源的质量、储量、开采运输条件作出评价和比选意见。其中初查储量应达到设计需求量的 2.5～3.0 倍。

详查　要求查明各种料源的储量、质量及开采、运输条件，并应考虑开采对环境的不利影响。储量应达到设计需求量的 1.5～2.0 倍。

gongcheng dizhitu

工程地质图

（engineering geologic map）　表示工程区与建筑有关的地形、地质现象的图件。反映建筑物区工程地质条件，是进行工程设计的基础资料，如岩土类别和构造断裂的分布、水文地质和物理地质现象以及地貌等。

工程地质图的比例尺分大、中、小 3 类。小于或等于 1∶50 000 为小比例尺，多用于流域规划；1∶50 000～1∶5000 为中比例尺，主要用以反映库区工程地质条件；大于 1∶5000 为大比例尺，主要用于水库地质以及坝址选择、布置水工建筑物等。

工程地质图一般有综合性工程地质图、专门性工程地质图、工程地质分区图、剖面图及柱状图 5 类。①综合性工程地质图。一般反映地形地貌、地层岩性、地质构造、物理地质现象及水文地质的有关内容。②专门性工程地质图。一般是突出反映某方面具有特殊意义的地质现象。③工程地质分区图。根据综合地质因素概括的反映各区段工程地质条件及其相对优劣程度。④剖面及柱状图。反映地表以下一定深度的地质构造、地层层序、接触关系、风化深度及地下水埋深等。

水电工程地质图的种类　包括：①区域地质图、构造纲要图、构造体系图、地震震中分布图及地震烈度区划图。反映工程建筑物区及其周围地质构造特征及历史地震情况，用以分析评价建筑物地区构造稳定条件。②库区地质图、岩溶水文地质图、滑坡分布图、塌岸范围及浸没分区图。评价水库渗漏、库岸稳定、淤积冲积物质来源及浸没程度的图件，也是移民安置、工程处理和防护的依据。③坝区（段）、坝址地质图。布置坝址勘探和选择坝址、坝线及研究坝基稳定、开挖和处理措施的基本资料。④发电、引水及泄洪建筑物区地质图。用以评价及选择厂房、引水线路，合理布置工程建筑物的基础资料。⑤天然建筑材料产地分布图、料场平面、剖面图。反映各种建筑材料产地与建筑物的相对位置、材料的埋藏、开采条件及储量等情况。⑥综合地层柱状图和钻孔柱状图。反映地层顺序、沉积频率、接触关系、岩浆活动等，可指出软弱层、隔水层及岩溶化岩层层位，并可概略的说明地质发展史和工程地质特性，指导工程地质测绘。

水电工程地质图的绘制　采用计算机 CAD 制图技术或三维制图技术进行编制。一般是以北为图的正上方，并标出经纬度，只有在严重影响图件的内容时方能斜置，但也应明显地标出北的方向。纵剖面图是由上游向下游自左向右绘制；横剖面图是面向下游由左向右绘制。为便于阅读，图例按地层、构造、地貌、物理地质现象、水文地质、勘探点、建筑物等分类依次排列，其中地层是从新到老，先是沉积岩，依次为变质岩和岩浆岩。各时代地层或岩性按惯例着色并标明地层或岩性代号。图幅布置尽量紧凑，利用面积不小于 75%，剖面的纵、横比例尺尽可能一致，如用变态比例，纵向一般不大于横向的 5 倍。

gongchengdizhixue

工程地质学

（engineering geology）　研究工程建设活动与自然地质环境相互作用的一门地质学科。它以普通地质学、岩石学、地貌学、第四纪地质学、构造地质学、动力地质学等基本学科为基础。为了研究岩土体的力学性质和稳定的需要，工程地质学与水文地质学、岩石力学、土力学和工程地震学等有密切的联系。

基本任务　包括：①评价工程建设区的工程地质条件；②预测和分析工程建设过程中及竣工后工程地质条件可能产生的变化与存在的问题；③选择最佳工程场地和提出防治不良地质现象应采取的工程措施，包括环境的保护与利用和地基处理等问题；④提供工程规划、设计、施工、监测所需的工程地质资料。

基本内容　包括：①工程岩土学。研究岩土体的工程地质性质，探讨岩土工程性质的形成和变化的规律。②工程动力地质学。研究与工程有关的动力地质现象，探讨其演化规律和防治措施。③工程地质勘察。根据各勘察设计阶段的要求，调查场地和建筑物区的工程地质条件，为工程设计提供地质依据。④工程地质分析及评价。在分析工程活动与地质环境相互作用的基础上，对场地及建筑物地基可能出现变化的各个方面的性质、规模和程度做出估计，为研究和比选防治措施提供依据。

研究方法　包括：①自然历史分析法，即地质分析法。通过地质调查分析，确定地质体正在经受的地质作用的阶段后，利用地质作用的发生、发展和终结的已知规律对地质问题作出趋势性的判断。所得结果是定性的，但往往对工程的规划、选点等布局和下一步地质勘察工作有重要的指导意义，同时也是进一步进行定量评价的基础。②计算模

拟法。通过对自然地质条件的简化，采用一定的公式进行数学计算分析，或者在实验室或计算机上对所研究的地质问题进行物理模拟或数值模拟。模拟法的优点是能在短时间内重现所研究问题的全过程或局部，了解作用机制，给出定量的结果，是运用较多的一种方法。由于自然地质边界复杂，不能做到完全模拟现场条件，因此，使用其结果时还需要结合实际情况综合考虑。③工程地质类比法，即工程经验法。通过与类似地质条件的类似工程实施结果的比较，判定所研究工程地质问题的可能状况，并据此采取工程措施的经验方法。在实际工作中，上述3种方法常结合使用，相互补充。

水电工程地质研究的主要内容　包括：①区域构造稳定性。主要是研究断层和地震的活动性对工程的可能影响和危害。根据区域地震地质背景、地震活动情况，进行地震安全性评价，确定建筑区的地震动峰值加速度、反应谱特征周期及相应地震基本烈度，预测水库地震的可能性及可能的震中位置与震级。②岩土体的变形和稳定。包括大坝及其他建筑物地基承载力和变形，大坝坝基抗滑稳定，自然及人工边坡岩土体的稳定（包括泄洪冲刷与雾化区的边坡稳定），地下洞室围岩稳定和岩爆、水库库岸塌滑等。③渗漏和渗透稳定。包括水库渗漏，特别是岩溶渗漏；由于水库的蓄水引起的库周浸没与岩溶管道倒灌内涝；坝基及绕坝渗漏的范围、渗漏量与扬压力及其对大坝和坝基（肩）岩体稳定的影响；第四纪松散地层及断层、破碎带、节理裂隙及岩溶洞隙充填物在渗压作用下的渗透稳定问题。④天然建筑材料的调查、比选及评价等。

水电工程地质研究的主要手段　包括：①遥感。常用的有可见光、光外、红外和微波扫描及摄影，除用于一般地质解译外，还可用来探寻水下泉水出露点（溶洞或暗河出口）等。②工程地质测绘与调查。它是工程地质最基本的工作手段。通过对地质现象的观察、描述和量测，并按一定的比例尺编制成工程地质图，用以指导勘探、试验和专门性勘察工作。③物探。应用地球物理学的原理，通过研究由于物理性质差异而引起的天然或人工地球物理场的变化，推断地下地质情况，或直接测定所需的岩土物理性质参数。主要方法有电法、地震勘探、水声勘探、弹性波测试、探地雷达法、层析成像、水声勘探、放射性测量等。④勘探。钻探是利用钻机在岩土体内造孔，采取岩心或土样，并进行水文地质试验，是了解地下地质和水文地质条件最常用的方法。平洞常布置在坝肩两岸、隧洞进（出）口及地下洞室轴线位置上，了解斜坡的覆盖层厚度、风化带、卸荷带、岩溶发育、岩体状态等。坑探常用于调查缓倾角的断层破碎带、软弱结构面以及第四纪地层的组成。⑤岩、土、水试验。分室内试验和现场试验，包括岩土物理性质、矿物和化学成分、水理性质和力学性质的测定和试验，以便确定分析计算采用的参数，论证建筑物地基、地下洞室和边坡的岩土体稳定条件。⑥水文地质试验。包括岩土体水文地质参数和地下水运动特征的测试。常规的野外试验有钻孔压水、抽水和注水试验，试坑注水试验、地下水流速与流向测定和岩溶通道的连通试验等。室内渗透试验常在勘察初期用于均质土层。⑦观测和监测工作。它是工程地质勘察过程中或工程竣工后根据需要布置的，一般包括地下水动态、岩土体变形（位）和地质构造活动性3部分。地下水动态观测内容通常包括水位（压）、水温、水质和流量。岩土体变形观（监）测通常包括建筑物地基、边坡和地下洞室围岩的应力、位移、变形、倾斜、沉陷和渗压等。地质构造稳定性观测包括地应力、活断层的位移、地倾斜和地震活动等。

工程地质学的发展　20世纪初期，为了适应兴建各种工厂、大坝、铁路、运河等大型建筑物的需要，地质学家开始介入解决大型建筑物中与地质有关的工程问题。工程地质开始成为一门独立的学科，工程地质勘察成为大型工程建设中不可缺少的一部分工作。20世纪五六十年代，各国先后加强了岩体结构的研究，强调岩体内断层、节理裂隙等结构面的作用，将岩体视作非连续体对待。奥地利的L. 缪勒(L. Muller) 等创立的萨尔茨堡学派是这方面的先驱之一。中国谷德振及其领导的中国科学院地质研究所工程地质研究室于这一期间创立的岩体工程地质力学也是这方面的一个代表。工程地质学有更加密切结合专门目的发展不同分支的趋势，已经出现了区域工程地质、环境工程地质、海洋工程地质、矿床工程地质等分支学科。中国已积累了在不同地质环境、各类岩性地区进行水力发电工程地质工作的经验，建立了一套比较完整的工程地质勘察规程规范，并研究了一些新技术，如无固相冲洗液金刚石覆盖层钻进技术，可取出近似原状的第四纪松散地层的样品（包括砂样）；制订了中国水电地下工程围岩分类、坝基岩体工程地质分类、边坡工程地质分级等；调查总结了软弱结构面和夹层的工程经验，对其在工程建筑中的危害性给予了足够的重视；系统总结研究了岩溶发育条件和规律，形成了系统的岩溶渗漏勘察方法与防渗处理技术；系统总结了在各种气候和地基上建高坝的勘察经验。水电工程建设将面临区域构造稳定性差、河床深厚覆盖层建坝、200～300m级高坝地基稳定、超高边坡稳定、深埋巨型地下洞室稳定等的地质勘察论证和专门性工程地质问题研究，需要从理论上和勘察技术等多方面加以解决，进一步推动工程地质学的发展。

参考书目

张倬元，王士天，王兰生，等．工程地质分析原理．3版．北京：地质出版社，2009.

河海大学，陆兆溱．工程地质学．2版．北京：中国水利水电出版社，2001.

gongcheng dizhi zuantan

工程地质钻探　(engineering geological drilling)

为了解地表以下的地质条件，利用专门造孔机械设备或工具，在岩（土）体中钻孔，并取出岩（土）心或岩土试验样品，测定地下水位，进行压（抽）水试验和地下岩土体原位力学性质测试等。是工程地质勘察的一种勘探手段，目的是了解与工程场地有关的工程地质和水文地质问题，见图。按钻孔倾斜程度分为垂直钻孔、倾斜钻孔及水平钻孔。在水电工程地质勘察中，较为常见的是垂直钻孔。钻探的施工钻进方法及机具种类较多，视其具体任务的需要采用。按钻进方式可分冲击钻进、回转钻进和冲击回转钻进3类。

冲击钻进　利用钻具自重对孔底进行冲击而破碎岩（土）体的一种钻进方法。主要适用于软弱岩层钻进。具有设备和工具比较简单、工艺操作简便，钻进过程中不需要冲洗介质循环，水量消耗小，钻进成本低等特点。但其破碎岩

石是不连续作业，钻头有效碎岩时间很短，大部分时间消耗于钻具在孔内往复运动上，也存在钻进效率较低的不足。该钻进方法运用较少。



工程地质钻探

回转钻进　在轴心压力作用下的筒状钻头用回转研磨方式切削岩石的一种取芯钻进方法。适于各种岩石中钻进，通称岩心钻探。根据钻头研磨材料可分硬质合金钻进、钻粒钻进和金刚石钻进。硬质合金钻进是使用硬质合金钻头，以回转方式切削岩石的钻进方法，一般适用于可钻性分级7级以下的岩石。钻粒钻进是向孔底投入钻粒（铁砂或钢粒），由筒状钢质钻头在一定压力下回转，辗砂破碎岩石的钻进方法，7级以上岩石适用。金刚石钻进是用金刚石钻头以回转方式切削岩石的钻进方法，可钻各种硬度岩石，尤其适用于极坚硬岩石，是常用的一种钻进方法。

冲击回转钻进　根据动载荷比静压载荷能够更有效破碎坚硬岩石的原理研制的钻进技术，它是综合了冲击钻进和回转钻进优点的一种钻进方法。适用于各种岩石钻进。其原理是在钻头上或岩心管上连接一个专门的冲击器，在钻进中给钻具以一定的轴向压力和回复运动，同时冲击器给钻具一定频率的冲击能量，在冲击和回转的共同作用下，钻头破碎岩石，进行钻进。其钻孔效率较高，但取心效果不如回转钻进。

gongcheng jiesuan (shuidian)

工程结算（水电）

(settlement of hydropower project)

发、承包双方根据合同约定，对工程项目合同价格完成或执行情况进行计算和确认的过程，是工程价款支付的依据。根据项目情况，建筑安装工程通常采用按月结算、竣工（完工）结算和结清方式；设备采购一般采用按交货进度分段结算方式。结算内容主要包括预付款、质量保证金、当期工程进度结算款。

预付款　发包人预付给承包人为合同工程施工购置材料、设备、修建临时设施以及组织施工队伍进场的金额。包括工程预付款和材料预付款，其额度和支付时间视承包合同的性质、承包合同的大小和双方的责任分工而定，一般为承包合同签约价的10%～30%，建筑安装工程和承包合同价大的项目取小值，设备采购和承包合同价小的项目取大值，一般在合同签订收到承包人预付款保函后按合同约定支付，通常在合同累计完成金额达到20%开始扣回，到累进完成80%～90%时扣清。如主要材料由发包人供应，预付款额度可小于下限值。合同总金额巨大，工期长达数年的，可采取分年或分期支付预付款。

质量保证金　在缺陷责任期内为处理工程质量缺陷由发包人扣留的工程价款。额度一般为合同价的2.5%～5%，从工程进度款第一个付款周期开始扣留5%～8%，至达到合同约定的总额止。在签发工程接受证书后可支付给承包人一半，承包人完成消缺并在缺陷责任期终止后再支付剩余部分。设备采购合同也可由承包人在设备最终验收证书颁发后出具特别质量保函代替质量保证金。

当期工程进度结算款　结算周期内按实际完成的工程量（或进度）进行结算的价款。结算周期末，承包人应按规定时间编报已完工程当期报表，监理人和发包人应在规定时间内完成报表的审核并返给承包人，承包人据此编制已完工程价款结算账单。内容主要包括项目名称、签约合同价总金额、当期申请结算工程价款、应抵扣款项、本次核定结算工程价款、累计结算工程价款、预付款余额等。应抵扣款项主要包括预付款和质量保证金。

gongchengliang qingdan

工程量清单

(bill of quantities)　工程建设过程中，把拟建项目中准备实施的全部工程项目和内容，按工程部位、性质以及它们的数量、单价、合价等通过列表的方式表示出来的明细表。是承包合同的重要组成部分，是编制招标工程标底、投标报价、合同价和工程结算的依据。编制工程量清单时必须依据行业主管部门颁发的工程量计算规则、工程量清单计价规范、设计图纸、施工现场情况和招标文件中的有关要求，由具有相应资质的咨询机构完成。

工程量清单是工程量清单计价的基础。招标文件中的工程量清单标明的工程量是投标人投标报价的共同基础，竣工结算的工程量按发、承包双方在合同中约定应予计量且实际完成的工程量确定。采用工程量清单方式招标，工程量清单必须作为招标文件的组成部分，其准确性和完整性由招标人负责。

工程量清单计价文件由封面、总说明、汇总表、分部分项工程量清单表、措施项目清单表、其他项目清单表、费用计算附表和附件组成。

gongcheng yaogan

工程遥感

(engineering remote sensing)　根据电磁波理论，以仪器（传感器）从远距离量测和记录目的物特征的探测方法。遥感的最大优点是能在短时间内取得大范围的图像和数据。依传感器的运载工具划分有航天遥感、航空遥感和地面遥感。

航天遥感　航天飞机、地球卫星及宇宙飞船等作为传感器的运载工具，以主动或被动方式取得遥感资料。卫星相片是航天遥感的主要资料，其特点是覆盖面积大、地质信息量多、分辨能力高、成像时间短。可用于研究区域地质构造，划分构造单元或构造体系，编制小比例尺地质图，也可用来监测某些地质环境的变化。另外，卫星上装载的反束光导管摄像仪（REV）及多光谱扫描仪（MSS）可分别得到3个波段和4个波段，甚至7个波段不同分辨效果的影像，能识别航片上难以区分的地质体。MSS4对水体有一定的穿透能力，影像上可看出水下地形甚至地质构造；MSS5影像能清楚反

映地层岩性，植物呈暗色；MSS6影像对水体显示清楚，地下水埋藏较浅时色调较暗，结合地貌及植物可圈定浅埋地下水的分布范围；MSS7影像上植被及地表水显示清楚，含水地层色调深，透水层色调浅，地层岩性及褶皱断裂也显示清楚。因此，使用时可根据各波段影像特点进行选择。

航空遥感　飞机、直升机及飞艇等作为传感器运载工具，以主动或被动的方式取得遥感资料，如普通航空相片、航空红外（见图）及侧视雷达成像等。航空相片的比例尺一般较大，中国已完成全国范围1∶50000的航空摄影，大部分地区有1∶35000、1∶25000的航片，局部地区还有1∶10000或更大比例尺的航片。航空遥感已广泛用于研究工程区的河谷形态、阶地分布、冲沟发育程度；滑坡、崩塌体、泥石流、岩溶洞穴和洼地的分布、冲洪积扇的特征；出露面积较大的侵入体、火山岩，性质差异明显的沉积岩及变质岩的分布；判译褶皱的轴向、形态和类型；断裂构造的分布、走向、规模及相互切割关系；地下水出露点的分布及补排关系等。随着人工活动的增加，滑坡、泥石流等地质灾害发生频率日益增高，采用航空遥感方法进行地质灾害调查的必要性日益突出，效果也较好。中国甘肃舟曲滑坡、贵州关岭泥石流等地质灾害发生时，均采用航空遥感进行调查、分析，取得了较好的效果。



长江三峡工程坝址地区航空彩红外照片

地面遥感　车、船及塔台等为传感器的运载工具或安置点，以主动或被动的方式取得遥感资料，如普通陆地摄影、彩色红外摄影及多波段陆地摄影等。其特点是影像比例尺大、清晰、分辨能力高、立体感强，不同波段影像可突出反映不同地质体的特征。中国水电工程勘察部门多利用陆摄相片研究人难以通行的高陡岸坡和峭壁上的断裂分布、地质结构体，作为编绘建筑区工程地质图的基础资料。

遥感相片地质解译　通常通过常规目视法、光学增强法和计算机自动成图法进行解译。

（1）常规目视法。解译的基本方法，其工作程序为：①搜集测区遥感、地质和地形等资料，图像处理、复制镶嵌图，建立解译标志。②室内解译。专业人员借助简单的仪器，根据建立的标志初步解译成草图。③野外典型地段实地校核初步解译的成果，搜集有关地质资料，分析误解或遗漏地质现象的原因，研究测区各种地质体的成像特征。④按现场核对结果修改和补充初步成果，绘制正式地质解译图表，编写地质说明。

（2）光学增强法。通过光学原理增强不清晰的影像或突出其一部分影像，以提高解译效果。常用的假彩色合成、彩色透明片及彩色等密度分割等都是解决这一问题的方法。

（3）计算机自动成像法。主要是将影像转换成数字化磁带，再根据光谱特性由计算机自动识别地质体和成图。

在水电工程地质勘察中，早已使用卫星相片、航空相片绘制地形图，并编制成地质图。除广泛应用卫星相片和普通航空相片外，航空红外摄影、多波段扫描及侧视雷达等技术也用于研究水库、工程区的某些专门地质问题，进行抽水蓄能电站的规划选点，都取得了较好的效果。常采用的航天遥感影像资料有TM、ETM、SPOT-1/2/3/4、SPOT-5、QB、ERS-1、SAR、LANDSAT-7等，其中QB、SPOT-5等精度较高，较适用于水电工程的详细勘察，可绘制比例尺为1∶2000的地形图，应用于工程地质调查及大比例尺地质图的编制、分析等。

gongcheng zongtouzi (shuidian)

工程总投资（水电） (total investment of hydropower project)　建设水电站所花费的以货币量表现的费用总和，即投资者进行水电站工程建设的全部投资，与水电站工程造价同义。水电站工程总投资分为静态投资和动态投资两部分。

gongzuo rongliang

工作容量 (generating capacity)　承担电力系统年内各月（旬）最大负荷日计划正常负荷的最大容量。水电站按水库调节后的水流出力运行时，能够为电力系统提供的发电容量，与水电站日平均出力、系统日负荷特性以及在系统日负荷图上的工作位置有关。当水电站调峰运行时，其工作容量在一天内变化很大；丰水期为了充分利用水能，水电站宜在电力系统腰荷或基荷工作，其工作容量在一天内变化较小。无调节能力或由于综合利用（如航运）要求而不担或少担系统调峰任务的水电站，其工作容量一天内不变或变化不大。水电站最大工作容量等于其基荷工作容量与峰（腰）荷工作容量之和。水电站为满足下游航运、供水、生态等用水要求须泄放的最小基流相应的发电出力为强制基荷。

在规划设计中，最具代表意义的是水电站在枯水年各月中最大负荷日的最大工作容量，尤其是系统供电最紧张的月中最大工作日的最大工作容量。它是决定水电站容量效益的重要指标。

当担负调峰任务时，在一天中，由于水电站24h的能量集中在尖峰的若干小时发电，故其日最大工作容量大于其日平均出力，水电站的工作位置越靠近尖峰，两者的差值越大。

工作容量计算方法为：

（1）计算水电站的强制基荷。强制基荷按照为满足下游航运、供水、生态等用水要求须泄放的最小基流和水头计算。

（2）当水电站进行日调节而不进行周调节时，电站时段（日或周）平均出力与强制基荷的差值乘以24为水电站日可调电量，用日负荷求其峰（腰）荷工作容量。

（3）当水电站进行周调节时，水电站时段（日或周）平均出力与强制基荷的差值乘以 168 为水电站周可调电量，用周负荷求其峰（腰）荷工作容量；或以日电量乘以周调节扩大系数（1.0～1.2，可用试算法求得），换算成最大工作日的电量，用日负荷求其峰（腰）荷工作容量。

（4）水电站的峰（腰）荷工作容量，可按其日（或周）电量，以其合适的工作位置，在日（或周）负荷电量累积曲线上求得。日负荷电量累积曲线是日负荷与该负荷以下电量的关系曲线，即可按图 1 所示，在其工作位置上划分线与电量累积曲线的交点，向左量与日（或周）电量（或可调电量）相等的横距，得一点 U，并由点 U 向下作垂线，交电量累积曲线于 L，通过点 L 所作的水平线为工作位置下划分线，则 U 与 L 的纵坐标差值即为水电站的峰（腰）荷工作容量；工作位置上、下划分线与日（周）负荷曲线所包围的阴影部分为水电站各小时的工作容量。工作位置上划分线越靠近尖峰负荷，其峰（腰）荷工作容量越大；若水电站的工作位置在最尖峰，则其工作位置的上划分线为最大负荷处。

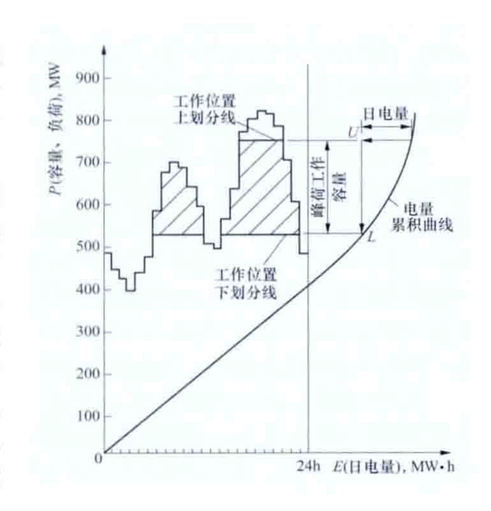


图 1　水电站工作位置图

（5）对已知工作容量 P 及日（或周）电量 E 的水电站，其工作位置的推求，可先扣除基荷的容量及相应的电量，得到可以调节的工作容量及可调节的电量 P' 和 E'，然后求其峰（腰）荷工作位置。采用图解法，将原电量累积曲线分别向左平移 E'，然后向下垂直移动 P' 作辅助曲线，辅助曲线与原电量累积曲线交于点 B，通过点 B 作水平线，即为峰荷工作位置的下划分线，由此向上量 P'，即为上划分线。而采用数解法时，可用试算法，找到峰荷工作位置的上、下划分线，两线与电量累积曲线的交点分别为 A、B，使 $P_A - P_B = P'$、$E_A - E_B = E'$，见图 2。在计算机上，则常将日负荷曲线转换为阶梯状的历时曲线，然后用迭代法或按 Z 替代法处理的线性规划法求解。

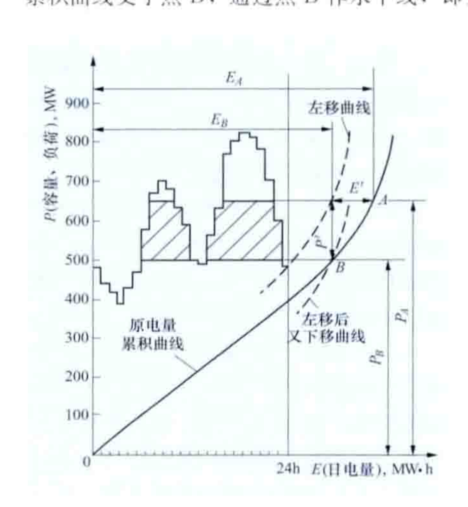


图 2　已知工作容量及日电量求工作位置图解

gongzuo zhamen

工作闸门

（service gate）　承担水工建筑物流道过水孔口的正常挡水或开启运行工作，能在动水中启闭的闸门。常用于调节水位、控制流量。船闸、升船机闸室的工作闸门一般在静水中启闭。

布置　工作闸门应设置在水工建筑物水流平顺、稳定的部位。在泄洪隧洞中，工作闸门可设在进口段、中段或出口段。在有弯道的泄洪隧洞中，要设置在弯道下游一定距离的直段上，以消除弯道引起的不良环向水流。布置于出口段时，门后通气充分，闸门上游为有压流，流速较低，水流流态好，工作可靠，闸门安装、运行和检修等比较方便。在流道中段或进口段设置工作闸门时，应注意门后通气，使闸下水流在泄洪过程中保持明流状态，避免产生闸门振动、空蚀等不良后果。在工作闸门的上游需设置事故闸门或检修闸门，为其提供维修条件。

门型　工作闸门的形式较多，常用的有弧形闸门（见图）、平面滑动闸门、平面定轮闸门、翻板闸门、人字闸门和横拉闸门等，其中人字闸门和横拉闸门多用于船闸闸室等。选型时，主要依据在水工建筑物的位置、孔口尺寸、运行水头以及制造安装和运用条件等因素，综合技术经济指标，经论证选用。每扇工作闸门都需有专用的启闭机操作。



潘家口水电站工程溢洪道弧形闸门

Gongboxia Shuidianzhan

公伯峡水电站

（Gongboxia Hydropower Station）

位于中国青海省循化撒拉族自治县和化隆回族自治县交界处。工程主要开发任务为发电，并兼顾灌溉、供水等综合利用效益，见图 1。电站装机容量 1500MW，多年平均年发电量 51.4 亿 kW·h。电站以 330kV 一级电压、4 回出线联入西北电力系统。工程投入运行后可改善下游 16 万亩土地的灌溉条件。

水文和水库特性　坝址控制流域面积 143 619km²，多年平均流量 703m³/s，年径流量 221 亿 m³，经上游龙羊峡水库调节后入库设计和校核洪峰流量分别为 500 年一遇 5440m³/s、10 000 年一遇 7860m³/s，对应上游李家峡水电站运行 20 年和 50 年，公伯峡水库年入库沙量分别为 709 万 t

和 748 万 t。水库正常蓄水位 2005.00m，总库容 6.3 亿 m^3，调节库容 0.75 亿 m^3，为日调节水库。

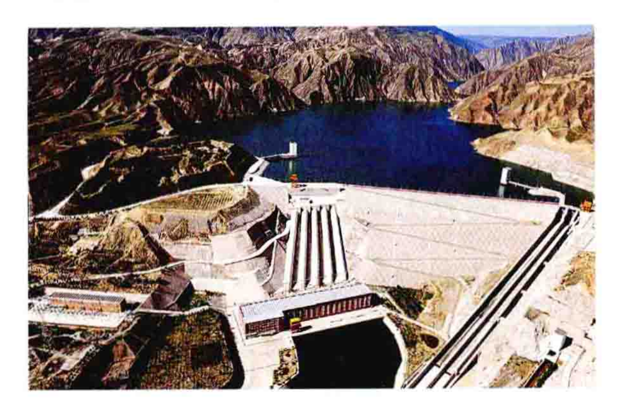


图 1　公伯峡水电站

坝址地形地质条件　工程区地震基本烈度为Ⅶ度，大坝地震设计烈度为 8 度。坝址位于公伯峡出口段，河道平直，河谷不对称，发育有Ⅰ～Ⅴ级河流阶地。坝址区主要岩性为片岩、片麻岩及上第三系砾砂岩和加里东期花岗岩。自上游右岸至下游左岸展布的岩性软硬相间，接触较复杂。变质花岗岩中断层较发育，主要有 F_7、F_{15} 等。

枢纽布置　枢纽工程由大坝、泄水建筑物、厂房等组成，见图 2。

大坝　混凝土面板堆石坝，最大坝高 132.2m，坝顶长 429m，坝顶高程 2010.00m，上、下游坡坡度分别为 1∶1.4 和 1∶1.5～1∶1.3。右岸Ⅲ级阶地砂砾石层采用混凝土面板防渗，全长 645m。

泄水建筑物　左岸开敞式溢洪道，设两个 12m×18m 的表孔，堰顶高程 1987.00m，最大泄量 4495m^3/s，挑流消能。左岸泄洪洞进口底板高程 1940.00m，岸塔式进水口平板检修门尺寸为 7m×9m，出口弧形工作门尺寸为 7.5m×6m，全洞长 607.0m，挑流消能，最大泄量 1183m^3/s。右岸水平旋流泄洪洞由导流洞改建形成，进口堰顶高程 1989.00m，平面工作门及检修门尺寸为 12m×16m，最大泄量 1060m^3/s。左岸灌溉取水口设在左副坝前扭面挡墙上，进口工作闸门尺寸为 2m×2m，设计引用流量 3.2m^3/s。右岸灌溉取水口设在电站进水口右边墩中，进口工作闸门尺寸为 2m×2m，设计引用流量 4.8m^3/s。

厂房　明渠引水式地面厂房，布置于右岸。引水渠长 300m，宽约 120m。电站进水口为混凝土重力坝式进水口，底板高程 1975.00m，最大坝高 58.0m，5 条明钢管直径为 8.0m，地面主厂房尺寸为 128.35m×29m×63.55m，内设 5 台单机容量为 300MW 的水轮发电机组，发电机层高程 1909.20m。水轮机转速为 125r/min，吸出高度为 −6.05m。

工程施工　采用围堰一次拦断河床、右岸导流洞泄流、基坑全年施工的导流方式。导流标准为 20 年一遇洪水重现期，导流流量为 1500～2000m^3/s。导流洞长 724.02m，断面尺寸为 12m×15m。导流洞下闸后设计度汛标准为 200 年一遇洪水流量 3770m^3/s，校核度汛标准为 500 年一遇洪水流量 4070m^3/s。工程于 2001 年 8 月开工，2002 年 3 月截流，2004 年首台机组发电，2006 年 8 月完工。

主要工程量：土石方明挖 1547.3 万 m^3，洞挖 25.78 万 m^3，土石方填筑 518.69 万 m^3，混凝土和钢筋混凝土 148.0 万 m^3，钢筋、钢材 25.2 万 t，帷幕灌浆和固结灌浆分别为 2.1 万 m 和 9.15 万 m。

设计单位　中国水电顾问集团西北勘测设计研究院。

建设单位　中国电力投资公司黄河上游水电开发有限责任公司。

gongba

拱坝　(arch dam)

向上游弯曲，通过拱的作用将承受的荷载主要传到峡谷两岸拱座的，以混凝土和砌石为主要材料的坝。拱座是拱坝的两岸坝基，亦称拱肩。拱坝的主要特点是：①坝体方量一般为相应重力坝的 30%～80%，是一种经济、可靠的坝型；②为超静定结构，超载能力强；③对坝址地形、地质条件要求较高，多修建在河谷狭窄、地质条件好的岩基坝址上；④坝身泄洪布置时需注意下泄水流的向心集中现象，妥善解决好下游的消能防冲问题，尤其应防止下游水流冲刷影响坝基及拱座的稳定。

类型　拱坝除按筑坝材料分为混凝土拱坝和砌石拱坝外，还可按立面的体型、水平拱圈的几何形状、坝体与基础的连接方式和厚高比等进行分类。

(1) 按立面的体型划分。可分为单曲拱坝和双曲拱坝，仅在水平面上弯曲的拱坝称为单曲拱坝，在水平和垂直断面上都弯曲的拱坝称为双曲拱坝，见图 1。

(2) 按水平拱圈的几何形状划分。可分为圆形拱坝、抛物线形拱坝、双曲线形拱坝、椭圆形拱坝、对数螺线形拱坝和二次曲线形拱坝。圆形拱坝又可分为单心圆形拱坝和多心圆形拱坝。多心圆形拱坝的水平拱圈的轴线由多个圆心的圆弧组成，以采用三圆心拱坝的居多。

图 2　公伯峡水电站枢纽平面布置图

1—面板堆石坝；2—右岸防渗帷幕；3—左岸溢洪道；4—左岸泄洪洞；5—右岸泄洪洞；6—导流洞；7—电站进水口；8—压力钢管；9—地面发电厂房；10—右岸开关站；11—电站下游护岸；12—上游横向围堰；13—下游横向围堰

按各个水平拱的厚度是否变化分为等厚拱拱坝和变厚拱拱坝。一般变厚拱是从拱冠向拱座加厚。

（3）按坝体与基础的连接方式划分。分为坝体周边嵌固在基岩上的拱坝和设有周边缝的拱坝。中国的拱坝多属前一种。有周边缝的拱坝沿坝底基础面设置垫座，在坝体与垫座之间设置周边缝，起铰接的作用，以改善坝体的应力状况。

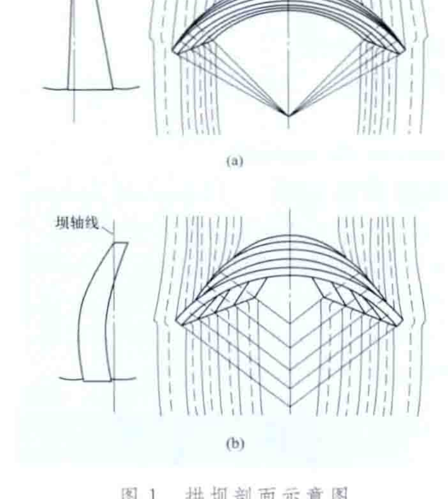


图1 拱坝剖面示意图
（a）单曲拱坝；（b）双曲拱坝

（4）按拱坝的厚高比划分。拱坝最大坝高处的坝底厚度与坝高之比小于0.2的为薄拱坝，介于0.2～0.35之间的为中厚拱坝，大于0.35的为厚拱坝或称重力拱坝。重力拱坝内设置纵向空腔的称为空腹拱坝（见空腹坝），厚高比与重力坝接近的拱形坝称为拱形重力坝，属于整体重力坝的范畴。1994年建成的中国隔河岩水电站，主坝高151m，采用了变封拱高程的上重下拱的重力拱坝的特殊结构形式。

作用荷载　有静水压力、动水压力、温度、自重、扬压力、泥沙压力、浪压力、冰压力和地震作用等。由于拱坝为三维超静定结构，因此温度作用对拱坝受力影响很大。确定温度作用时需先计算拱坝横缝灌浆（即封拱）时的坝体温度场，根据相对于封拱时的年平均温度场的变化，分别计算坝体最大温升和温降的数值。

拱座稳定　自1959年坝高66.5m的法国马尔巴塞（Malpasset）双曲拱坝因拱座滑动失稳溃决后，各国对拱坝拱座稳定问题都十分重视，采取包括选择有利的坝址、坝线，加强地质勘察、岩石力学试验研究和分析计算，以及进行灌浆、排水、锚固和混凝土置换等综合措施对拱座进行加固处理。（见拱座稳定、岩基处理）

应力分析　拱坝主要承受压应力。受荷载作用后坝体内的应力分布及拉、压应力值是影响工程安全的重要因素。拱梁分载法是拱坝应力分析的基本方法，对于高拱坝或坝内设有大孔洞或基础条件复杂的拱坝，还应采用有限元法分析或用结构模型试验验证。采用弹性有限元法分析时，应力计算成果应进行等效处理。拱坝应力除按分项系数极限状态表达式进行控制外，在荷载作用持久状况、基本组合情况下，采用拱梁分载法计算的坝体最大拉应力不得大于1.2MPa，采用有限元法计算的坝体最大拉应力（等效处理后）不得大于1.5MPa。

简史　人们很早就知道利用拱的作用修建水坝。公元3世纪修建的坝高12m的鲍姆（Borm）砌石圆筒拱坝（位于今法国），是世界上最早的一座拱坝。此后，土耳其、伊朗、西班牙和意大利等国相继修建了一些砌石拱坝。1884年，美国修建了世界上第一座混凝土拱坝——熊谷（Bear Valley）拱坝，坝高20m。20世纪初，拱坝设计计算还采用圆筒法。20～40年代，拱坝设计理论得到发展，美国内务部垦务局（U. S. Bureau of Reclamation，USBR）提出了较完整的试载法（也称拱梁分载法），使拱坝的设计达到了较高的水平。50年代以后，美国、法国、意大利、葡萄牙、西班牙、瑞士、日本、苏联等国家修建了大量拱坝，特别是双曲薄拱坝发展很快。20世纪世界上最高的拱坝是1984年苏联（今格鲁吉亚）建成的英古里（Inguri）拱坝，坝高271.5m，见图2。中国第一座拱坝是1927年在福建厦门建成的上里砌石拱坝。50年代末分别建成了坝高78m的流溪河双曲拱坝和坝高87.5m的响洪甸重力拱坝。80年代以后，以中国为代表的世界拱坝技术发展迅速，具有代表性的已建和在建的高拱坝有：台湾省的德基双曲拱坝（坝高181m）、青海省的龙羊峡重力拱坝（坝高178m）、四川省的二滩双曲拱坝（坝高240m）、云南省的小湾双曲拱坝（坝高294.5m）、四川省锦屏一级双曲拱坝（坝高305m）、溪洛渡双曲拱坝（坝高285.5m）和白鹤滩双曲拱坝（坝高289m）。

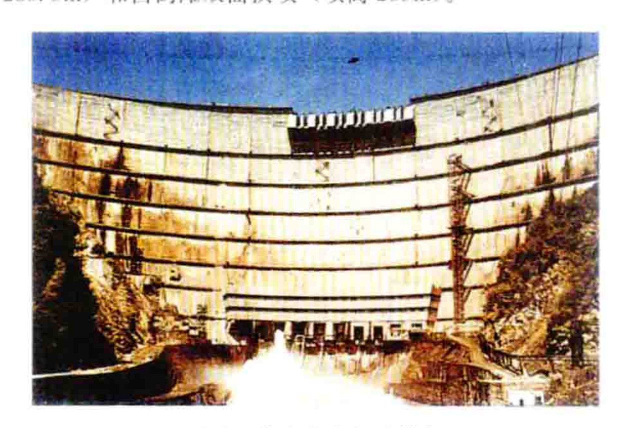


图2 英古里水电站拱坝

gongzuo wending

拱座稳定 (stability of arch dam abutment)

拱坝两岸坝肩（坝基）的稳定。它具有岩质坝基抗滑稳定的一般性质（见坝基稳定）。拱坝为超静定空间结构，作用在坝上的外荷载主要通过拱的作用传递至两岸拱座岩体，依靠坝体混凝土的强度和两岸坝肩岩体的支撑，保证拱坝的稳定。拱座受力一般较其他坝基大，为空间力系，受力条件复杂。拱座内多含有断裂构造，与临空面组合形成控制拱座稳定的块体。拱座失稳主要为滑动失稳和变形失稳。法国马尔巴塞（Malpasset）双曲拱坝，坝高66.5m，蓄水5年后，1959年，由于左岸拱座滑动失稳溃坝，造成严重的生命财产损失，引起世界对拱座抗滑稳定的普遍重视。

拱座稳定影响因素　主要有地形、地质条件，拱坝体型，工程布置等。两岸地形雄厚、向下游收缩、无沟谷切割、岩体坚硬完整对拱座稳定有利。断裂构造多、规模大、产状不利、存在软弱夹层、形成临空滑动边界等是拱座稳定的不利条件。优化坝体体型，使拱座推力指向山里，可以改善拱座的稳定条件。工程布置和施工时要注意避免拱座及其下游岩体遭受破坏，防止泄洪时高速水流的冲刷。

拱座稳定计算　通常使用的有（二维、三维）刚体极限

平衡法，这是拱坝坝肩抗滑稳定分析的基本方法。对高坝或地质条件复杂的拱坝，还应采用有限元法计算或地质力学模型试验验证，分析拱坝坝基在正常运用工况、降强和超载作用下的拱座变形稳定和抗滑稳定安全性。

拱座稳定评价　根据拱座的地质构造，分析拱座岩体可能滑动（或变形）失稳的边界条件，确定滑动边界上的抗剪强度指标（或拱座的变形模量）和拱座所受空间力系，用计算分析或模型试验方法推求拱座抗滑稳定安全系数，以及拱座变形对坝体应力的影响。综合考虑以上各种因素和条件，结合工程类比，对拱座稳定作出评价。

刚体极限平衡法：1、2 级拱坝及高拱坝满足承载能力极限状态设计表达式为

$$\gamma_0\psi\Sigma T \leqslant \frac{1}{\gamma_{d1}}\left(\frac{\Sigma f_1 N}{\gamma_{m1f}}+\frac{\Sigma C_1 A}{\gamma_{m1c}}\right)$$

其他则应满足上式，或

$$\gamma_0\psi\Sigma T \leqslant \frac{1}{\gamma_{d2}}\times\frac{\Sigma f_2 N}{\gamma_{m2f}}$$

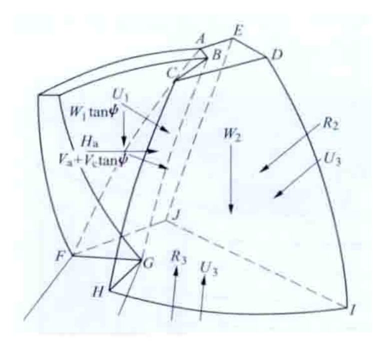


图 1　空间抗滑稳定计算简图

ABGF—拱坝建基面；AEJF—拱端上游拉力面；EDIJ—侧滑面；FGHIJ—底滑面；H_a—拱端轴向力；V_a—径向剪力；V'_c—梁底剪力，$V'_c=V_c\tan\psi$；U_1、U_2、U_3—渗透压力；W—坝体及坝基滑块总重量（含水体重），$W=W_1\tan\psi+W_2$

式中 γ_0 为结构重要性系数；ψ 为设计状况系数；T 为沿滑动方向的滑动力；f_1 为抗剪断摩擦系数；N 为垂直于滑动方向的法向力；C_1 为抗剪断凝聚力；A 为滑裂面的面积；f_2 为抗剪摩擦系数；γ_{d1}、γ_{d2} 为两种计算情况的结构系数；γ_{m1f}、γ_{m1c}、γ_{m2f} 为两种表达式的材料性能分项系数。

典型的空间抗滑稳定计算简图见图 1。拱座抗滑稳定分析原则上应按空间问题处理，确定其整体抗滑稳定安全系数。在情况简单、无特定的空间滑裂面时，可按平面拱圈作初步核算。两种分析方法的示意图分别见图 2 和图 3。

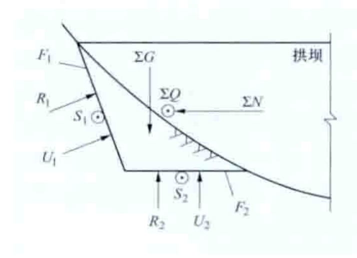


图 2　拱座整体抗滑稳定分析示意图

F_1—侧滑面；F_2—底滑面；ΣG、ΣN、ΣQ—拱坝作用在拱座的空间力系；R_1、S_1、R_2、S_2—侧滑面和底滑面上的反力；U_1、U_2—渗透压力

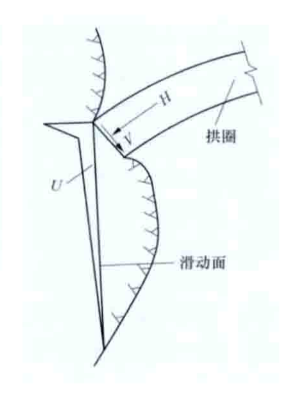


图 3　平面拱圈抗滑稳定分析示意图

H、V—拱圈传递给拱座的力；U—作用在滑动面上的渗压力

有限元法可以得出拱座各点的应力和变形，用以分析各点的局部稳定条件和拱座变形对拱坝的影响。模型试验方法中以地质力学模型试验最为完善，它可以较好地模拟拱座的地质条件，但其试验工作量大、模拟技术复杂，适用于大型工程或地质条件复杂的拱座稳定研究。

gongyong kurong

共用库容

（shared storage capacity）　见洪水调节。

Goupitan Shuidianzhan

构皮滩水电站

（Goupitan Hydropower Station）

位于中国贵州省余庆县境内乌江上，开发任务以发电为主，兼顾航运、防洪及其他综合利用。电站装机容量 3000MW，多年平均年发电量 96.82 亿 kW·h。以 500kV 一级电压接入系统，500kV 出线共 3 回，其中本期 2 回、预留 1 回，向广东省送电，见图 1。



图 1　构皮滩水电站

水文和水库特性　坝址以上流域面积 43 250km²，多年平均流量 716m³/s，多年平均径流量 226 亿 m³。500 年一遇设计洪水流量 27 900m³/s，相应库水位 632.89m；5000 年一遇校核洪水流量 35 600m³/s，相应库水位 638.36m，总库容 64.51 亿 m³；正常蓄水位 630.00m，相应库容 55.64 亿 m³；死水位 590.00m，调节库容 29.02 亿 m³，为年调节水库。

枢纽布置　枢纽工程由大坝、泄水建筑物、引水发电系统、通航建筑物等组成，见图 2。

大坝　混凝土抛物线形双曲拱坝，坝顶高程 640.50m，最大坝高 230.50m，坝顶上游面弧长 557.11m，拱冠顶厚 10.25m、底厚 50.28m，最大中心角 88.56°。

泄水建筑物　包括坝身表孔、中孔、水垫塘和泄洪洞。

坝身表孔设置 6 个，堰顶高程 614.00m，孔口尺寸 12m×16m（宽×高，下同）。中孔设置 7 个，孔口尺寸 7m×6m，出口采用大差动布置。在校核洪水条件下，下泄流量为 28 900m³/s，最大泄洪功率达 42 000MW。水垫塘长约 332m，底宽 70m，断面形式为复式梯形断面。二道坝顶高程 444.50m，最大坝高 27.50m，下游设置长约 45m 的防冲护坦。泄洪洞采用有压洞接明流隧洞的形式，工作闸门控制断面孔口尺寸 10m×9m，出口采用挑流形式，下设预挖冲坑消能。

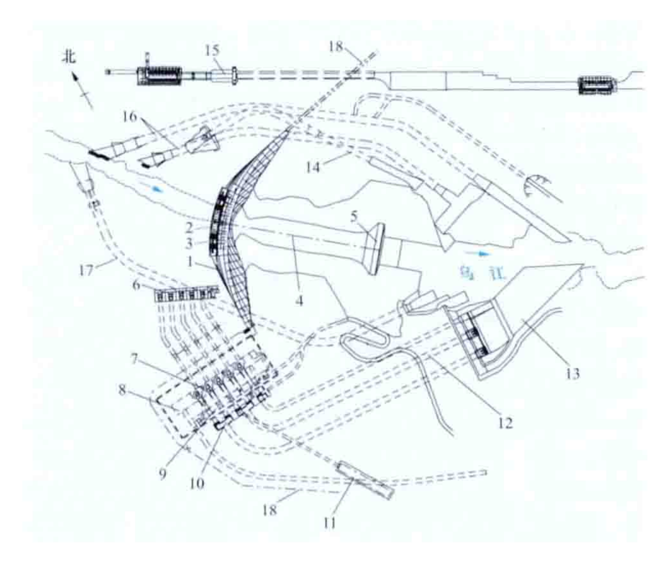


图 2 构皮滩水电站枢纽平面布置图

1—拱坝；2—表孔；3—中孔；4—水垫塘；5—二道坝；6—电站进水口；7—主厂房；8—安装场；9—主变压器洞；10—尾水调压室；11—地面开关站；12—尾水隧洞；13—尾水渠；14—泄洪洞；15—通航建筑物；16—左岸导流洞；17—右岸导流洞；18—防渗帷幕线

引水发电系统　位于右岸，进水口采用岸塔式；引水隧洞采用一机一洞布置方式；主厂房最大开挖尺寸为230.45m×27m×73.32m（长×宽×高，下同），主变压器洞位于其下游30.0m，与之平行布置，最大开挖尺寸为207.10m×15.8m×21.34m；尾水隧洞，1～4号机组采用两机一洞、5号机组采用一机一洞的联合布置方式。厂内安装5台单机容量为600MW的混流式水轮发电机组，转轮直径7.0m，水轮机和发电机额定效率分别为94.37%和98.8%。地下主变压器室设16台容量为223MV·A的500kV单相升压变压器。500kV屋外开关站布置在右岸坝肩下游。

通航建筑物　在左岸预留通航建筑物位置，设计采用带两级中间渠道的三级垂直升船机，最高通航水头199.0m，设计通航标准为Ⅳ级航道、通行500t级船舶。第一级和第三级升船机采用船厢下水式，第二级采用钢丝绳卷扬全平衡式。

工程施工　施工导流采用围堰全年挡水、隧洞导流方案。工程于2003年11月开工，2004年11月截流，2009年7月首台机组发电。主体工程于2009年11月完工（不含通航建筑物），同年12月全部机组投产发电。

主要工程量：土石方开挖1090.2万m^3，石方洞挖257.7万m^3，混凝土浇筑685.6万m^3，帷幕灌浆33.9万m，钢材（金属结构）5.9万t，钢筋28.5万t。

设计单位　长江水利委员会长江勘测规划设计研究院（现长江勘测规划设计研究有限责任公司）。

建设单位　贵州乌江水电开发有限责任公司（现中国华电集团公司）。

gu hechuang

古河床　(buried river course; ancient river bed)

河流变迁改道或下切后遗留的早期河道。又称古河道。保存的早期冲积层是判定古河床存在的主要依据，同时结合两岸垭口地形、台地地形、阶地等综合分析判断，一般与阶地高程相对应。

平原地区古河床形态需根据呈带状分布的断续沙堤、鬃岗、水洼地、牛轭湖等微地貌以及沉积物特点，通过勘探确定。山区古河床多在现代河谷谷坡或分水岭地带保留断续的河谷形态和阶地沉积物、堆积物、溶蚀洞穴等的遗迹。

古河床中的砂砾石冲积层是砂矿和地下水可能的储存带，也是建筑材料混凝土骨料的产地，常见有一定固结，碳酸盐岩地区有钙华胶结。水工建筑物枢纽布置中，常利用古河床地形垭口布置泄水建筑物或副坝。因此，在水电工程前期勘察中需要查明古河床分布范围、高程和冲（堆）积层的组成、成因、分布等情况，为合理利用有利地形和评价地基稳定提供依据。

Guli Shuidianzhan

古里水电站　(Guri Hydropower Station)

又名拉乌·利欧尼水电站（Raul Leoni Hydropower Station），位于委内瑞拉东部、南美洲第二大河奥里诺科河的支流卡罗尼（Caroni）河上，距首都加拉加斯东南约600km，见图1。工程分两期开发。初期装机容量2660MW；二期工程完工后电站总装机容量9100MW，多年平均年发电量510亿kW·h；机组更新改造后，电站总装机容量10 200MW。采用400kV超高压和800kV特高压输电。

水文和水库特性　坝址位于卡罗尼河河口以上95km处，坝址以上流域面积8.5万km^2。流域内平均年降水量2000mm，多年平均年径流量1537亿m^3。流域内森林覆盖率达74%。初期正常蓄水位215.00m，相应库容170亿m^3，调节库容111亿m^3。二期正常蓄水位270.00m，总库容1350亿m^3，调节库容854亿m^3，库容系数由0.07提高到0.56。



图 1 古里水电站

工程地质条件　坝址基岩为坚硬的花岗片麻岩。

枢纽布置　枢纽工程由大坝、泄水建筑物、厂房组成，见图2。

大坝　主坝为混凝土重力坝，初期最大坝高110m，顶长846m。右岸土石坝长220m，二期施工时作上游围堰用。二期工程施工时，加高混凝土重力坝52m，最大坝高达162m，坝顶长1426m；增建左、右岸土石坝，长度分别为2000m和4000m，最大坝高102m；增建水库边副坝多座，共长32000m，最大坝高45m。

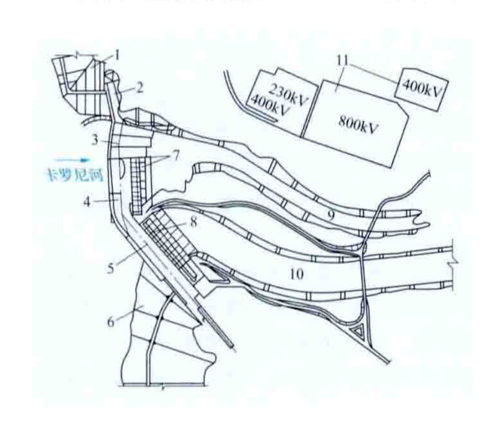


图2　古里水电站枢纽平面布置图

1—左岸土石坝；2—左岸重力坝；3—溢洪道；4—右岸重力坝；5—重力坝加长段；6—右岸土石坝；7—1号厂房；8—2号厂房；9—1号尾水渠；10—2号尾水渠；11—开关站

泄水建筑物　溢流坝段长184m，设9个溢流孔，每孔宽15.24m、高20.76m，孔口设弧形闸门控制。溢洪道分3道泄槽，槽间用混凝土墙隔开，初期最高洪水位219.50m时泄洪能力为40000m³/s。加高大坝时，1道泄槽施工，其余2道泄槽用于泄洪。右坝肩1400m处利用垭口建自溃式非常溢洪道，可泄洪10000m³/s。二期工程分期加高溢洪道，升高堰顶55m。

厂房　坝后式厂房，共装5种混流式水轮发电机组。初期工程共安装3台180MW和7台303MW机组，1号厂房总装机容量达2660MW。二期工程增建2号厂房，厂房安装10台水轮发电机组，水轮机转轮直径7.2m，转速112.5r/min，额定水头为130m时，流量512m³/s，额定出力610MW；水头为146m时，最大出力730MW。发电机额定功率700MV·A，最大功率805MV·A。每台发电机接3台268.5MV·A单相变压器组成的发电机变压器单元组，升压至400kV和800kV。初期工程的机组，因水头提高，总容量提高到3000MW。

工程施工　初期工程于1963年开工，1968年3台机组投产，1977年完成1号电站10台机组的安装。1976年开始2号厂房建设，1984年机组开始发电，1986年全部机组投产。2007年对2号厂房内的5台机组进行更新改造。

主要工程量：一期工程，土石方开挖767万m³，土石方填筑347万m³，混凝土浇筑174万m³；二期工程，土石方开挖1433万m³，土石方填筑8543万m³，混凝土浇筑671万m³。

gujie guanjiang

固结灌浆　(consolidation grouting)

为改善岩石力学性能而进行的灌浆。固结灌浆的主要作用是：①提高岩石的变形模量和承载强度；②加强岩石的密实性和均一性；③减少岩石变形和不均匀沉陷。

在岩石基础上建坝，常需进行固结灌浆。灌浆范围根据地质条件、岩石完整情况、坝型以及基础岩石受力条件等而定。建造重力坝时，如果岩石比较完整、坚硬，且坝不高，可仅在坝基内的上游和下游应力大的地区内布孔；如果岩石比较破碎，且坝又较高，则多在坝基内全面布孔。高的混凝土重力坝有时还需在坝基外的上、下游一定范围内增加布孔。建造混凝土拱坝时，常需对两岸拱座岩石加强固结灌浆。坝基固结灌浆孔常布置成梅花形、六角形和方格形。固结灌浆孔一般均较浅，可采用风钻或潜孔钻钻孔。

当岩石裂隙较多且较破碎时，坝基固结灌浆施工多在岩石表面上浇筑混凝土压重后进行。其优点是不会发生表面冒、漏浆，可适当地提高灌浆压力，易于保证灌浆质量；缺点是易和浇筑混凝土发生干扰。当岩石坚硬、完整、裂隙少时，也可安排在浇筑混凝土前进行，即无盖重灌浆。其优点是施工方便，对浇筑混凝土的干扰少；缺点是压力较低，易发生表面冒、漏浆，影响灌浆质量。无盖重灌浆又有两种情况：浇筑找平混凝土后灌浆和在裸露基岩上灌浆。找平混凝土也可以用喷混凝土代替。灌浆施工必须遵循逐渐加密的原则，一泵一孔单独灌浆，只有在特殊情况下才允许一泵多孔同时灌浆，但应采用并联方式，且使用一台泵同时进行灌浆的孔数不宜多于4个。灌浆使用水泥浆，一般从水灰比为3（或为2）开始，比级宜少，逐级变浓；当吸浆量大时，也可酌情越级变浓。灌浆结束标准为：在规定的压力下，当吸浆量不大于1L/min时，持续30min即可结束。当灌浆压力大于3MPa时，一般称为高压固结灌浆。

固结灌浆效果检查应以岩石力学性能改进的程度为主要标志。检查方法为：①声波法。在灌浆前后，测试岩石的波速（用以计算动弹性模量）或静弹性模量。②压水试验法。灌浆结束后，采用钻检查孔，进行压水试验和灌浆的方法，以透水率和单位水泥注入量来检验固结灌浆效果。两种方法可单独或联合采用。

在岩石中建造水工隧洞的固结灌浆，应在回填灌浆后进行。灌浆孔顺洞轴线呈环形排状布置，相邻环排的灌浆孔相互交错，呈梅花形。施工工艺和质量检查方法与坝基固结灌浆相似。

guti lixue

固体力学　(solid mechanics)

研究可变形物体在载荷、温度、湿度等外界因素作用下，其内部各个质点所发生的位移、运动、应力、应变、破坏等现象规律性的学科。是力学的一个分支学科，研究内容包括弹性问题和塑性问题、静力问题和动力问题、线性问题和非线性问题。非线性问题又有几何非线性和物理非线性两类。解题方法有解析法和数值分析法两类。

学科分支　根据研究对象和研究方法的不同，固体力学可以分为材料力学、弹性力学、塑性力学、结构力学、断裂力学、振动理论、稳定性理论、复合材料力学等次级分支学科。

材料力学　研究材料在载荷作用下的力学特性。采用一些合理的假设，使理论和计算大为简化，并能得到精度满足设计要求的结果。材料力学在生产实践中应用最广，是其他力学分支的基础。

弹性力学　研究弹性物体在载荷和其他外界因素作用下产生变形和应力的学科。在弹性力学中，除对介质作弹性、

均质和连续等基本假定外，不附加其他假定。

塑性力学　研究物体超过弹性极限后的永久变形和作用力之间的关系，以及物体内部应力和应变的分布规律。与弹性力学的区别在于它考虑物体内产生的卸荷后不能恢复的永久变形。物体受力后常有弹塑性区并存的情况。

结构力学　研究工程结构承受和传递外力的能力和规律，以及结构优化问题；计算确定满足强度、刚度和稳定性条件而又经济合理的结构物断面尺寸；侧重于对杆件和板壳等构成的复合体系的分析和设计。

断裂力学　研究结构中裂纹尖端的应力场及应变场，并由此分析裂纹扩展条件和规律。

振动理论　研究固体在周期性运动或某种随机运动过程中的各种现象及其发生条件。

稳定性理论　研究细长杆、杆系结构、薄板等在压力作用下的变形和屈曲问题，以及丧失平衡状态和承载能力的条件。

复合材料力学　研究由两种以上不同性能材料组成的多相固体的受力和变形规律，并按微观力学、细观力学和宏观力学 3 个层次进行研究。

发展概况　古代人类的生产活动中，早已应用了不少固体力学的基础概念。公元前 2000 年前就已建造出符合现代力学概念的宫殿、桥梁等建筑物和简单的车、船以及各种机械。但是直到 1678 年英国人 R. 胡克（R. Hooke，1635—1703）提出物体的变形与所受外力成正比的定律，固体力学才奠定了其发展的基础。经过瑞士 L. 欧拉（L. Euler，1707—1783）、法国 C. A. 库仑（C. A. Coulomb，1736—1806）、A. L. 柯西（A. L. Cauchy，1789—1857）以及意大利 A. 卡斯蒂利亚诺（A. Castigliano，1847—1884）等科学家的努力，固体力学逐步具备了完整的理论体系和有效的解题方法。早期的固体力学理论是以均匀连续介质为基础的，20 世纪二三十年代出现断裂力学和复合材料力学以后，其研究范围扩大到非均匀的连续体以及含有断裂结构的非连续体。电子计算机和有限元法的发展，使固体力学的原理可用于求解很多复杂的问题。

guandao shuili shunbian

管道水力瞬变

(hydraulic transients in pipe)　由于管道中液体流量变化引起的压力增减现象。又称管道非恒定流，习惯上也称为水击、水锤。

引起管道水力瞬变的主要原因是：①阀门发生偶然的或是预定的变化；②泵或水轮机的起动和停止；③水轮机输出功率的变化；④上游水库或水池水位的改变；⑤水库上的波浪；⑥水轮机调速器的振荡；⑦泵或水轮机中叶轮或导叶的振动；⑧可变形的一些附件（如闸门）的振动；⑨旋涡引起的引水管或水轮机尾水管的不稳定。

对管道水力瞬变，不仅要考虑运动要素，如流速、压力随时间的变化，而且需要考虑管壁和水体弹性的影响。管道水力瞬变一般按一维流动处理，其连续性方程和运动方程分别为

$$\frac{\partial H}{\partial t}+v\frac{\partial H}{\partial x}+\frac{a^2}{g}\times\frac{\partial v}{\partial x}-v\sin\theta=0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial H}{\partial x}+\frac{v}{g}\times\frac{\partial v}{\partial x}+\frac{1}{g}\times\frac{\partial v}{\partial t}+\frac{f\mid v\mid v}{2gD}=0 \tag{2}$$

式中 H 为瞬时测压管水头；t 为时间；v 为瞬时流速；x 为从任意起点开始的沿管轴的坐标距离；a 为水击波速；g 为重力加速度；θ 为管道和水平线的夹角，当高度沿 x 方向下降时 θ 为负；f 为管道沿程阻力系数；D 为管道直径。

对式（1）和式（2）偏微分方程，普遍采用特征线方法数值求解。特征线方法的优点有：①稳定性准则可以建立；②可以处理边界条件很复杂的系统；③适用于各种管道水力瞬变分析，包括汽液两相瞬变流；④在所有差分法中具有最高的精度。

水电工程中的管道水力瞬变问题，主要有水轮机突甩负荷和水泵事故断电（又称动力丢失）、调压室系统的涌浪波动、管道系统的水力振荡。水力瞬变过程中会发生下述现象：①管道水压急剧上升；②水压急剧下降到蒸汽压力而导致液体汽化和液柱分离，并在液柱重新聚合时产生巨大的冲击压力；③管道水力共振；④水轮机机组转速上升超过允许值，或水泵反向飞逸转速超过允许值。这些现象可导致管壁破裂、水轮机和泵部件损坏，造成灾难性事故，在设计和运行中应尽量避免。

分析水力瞬变问题时，须考虑管道边界条件，如水库、管道分叉、阀门、调压室（包括气垫式）、水泵或水轮机特性（一般由模型转轮试验特性曲线确定）、机组转动惯量（GD^2）以及调速器特性等的影响。

控制水力瞬变的常用方法是：①合理选择控制阀门，包括水轮机导叶和水泵止回阀的启闭规律；②在水电站管道上设置普通调压室或气垫式调压室；③在泵站管道上设置单向调压室和蓄能器（空气罐）；④采用减压阀；⑤设置空气阀或真空破坏阀防止液体汽化；⑥增大管径；⑦增大机组转动惯量等。这些方法可以单独使用，也可以同时采用几种方法，需通过多种方案的技术经济比较确定。

参考书目

Chaudhry M H. Applied Hydraulic Transients. Canada: Van Nostrand Reinhold Comp., 1979.

Wylie E B, Streeter V L. Fluid Transients. New York: McGraw-Hill Publishing Co., 1978.

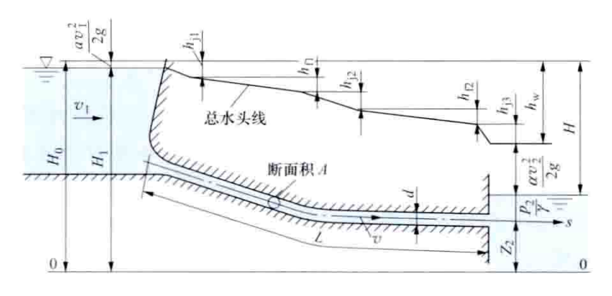
guandao shuilixue

管道水力学

(pipeline hydraulics)　研究有压管道系统内液体流动问题，是水动力学的分支学科。管道水力学的研究内容包括有压管道内的单相流、多相流和非牛顿流体的流动。水力发电工程的压力隧洞、电站机组引水管道，农田水利中的涵管、倒虹吸管、喷灌管道，城市自来水管网中的水流，原子反应堆的液体循环冷却管路系统内的液体流动为单相流。放淤管道中的含沙水流、工业输送管道和排污管中的液-气-固多相混合流、生物工程中的血管流等为多相流或非牛顿流体的流动。这类管道内的流动极为复杂，涉及各相的体积浓度、速度、压强、温度等因素及其场分布规律，相间相对滑动、动量传递、传质、传热以及化学反应、电磁效应等关系，多相流的阻力，流动的稳定性，流动类型及临界状态等问题。

管道内的有压流动，按流体类型分为单相流或多相流，按

管中流动特性分为层流或紊流、恒定流或不恒定流，按管道的布置形式分为简单管道（沿程直径不变的单一直圆管，见图）或复杂管道（沿程变断面的管路、弯管、叉管、管网等）。



简单管道图例

简单管道内水体的恒定流动是管道水流的基本形式，参照图例可写出连续方程、能量方程及管道水头损失 h_w 的表达式如下

$$Q = vA$$

$$H_0 = H_1 + \frac{\alpha v_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{\alpha v_2^2}{2g} + h_w$$

其中 $$h_w = \sum h_j = h_f$$

$$\sum h_j = \sum \zeta \frac{v^2}{2g}$$

$$h_f = \lambda \frac{L}{d} \times \frac{v^2}{2g}$$

式中 Q 为流量；v 为断面平均流速；A 为管道断面面积；H_0 为以水头表示的势能；H_1 为断面1的压力水头；p 为压强；Z 为位置高度；下标1、2分别表示上、下游断面的量；γ 为水的重度；g 为重力加速度；$\sum h_j$ 为局部水头损失；ζ 为局部损失系数；h_f 为沿程水头损失；λ 为阻力系数（见水流阻力）；d 为管径；L 为管长。若 $H = H_0 - Z_2 - \frac{p_2}{\gamma}$ 为上下游水位差，则简单管道的输水流量

$$Q = \frac{A}{\sqrt{\alpha + \lambda \frac{L}{d} + \sum \zeta}} \sqrt{2gH}$$

通常令 $\mu_c = \frac{A}{\sqrt{\alpha + \lambda \frac{L}{d} + \sum \zeta}}$ 为管路系统流量系数。对于复杂管道，常分解为简单管道的组合，但需计及各种类型的局部水头损失。大的管网系统有时包括分支状管网或环状管网。

当有压管道系统中通过的流量随时间变化时，为管道不恒定流。描述这类管流的基本方程组是一维不恒定渐变总流的连续方程、运动方程或能量方程。当管中液体不可压缩、密度 ρ 为常数时，可参照图例写出

$$\frac{\partial}{\partial S}(Av) + \frac{\partial A}{\partial t} = 0$$

$$\frac{\partial Z}{\partial S} + \frac{1}{\gamma} \times \frac{\partial P}{\partial S} + \frac{1}{g}\left(\frac{\partial v}{\partial t} + v\frac{\partial v}{\partial S}\right) + \frac{4\tau_0}{\gamma d} = 0$$

或 $$Z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} + h_w \frac{1}{g}\int_1^2 \frac{\partial v}{\partial t} dS$$

式中 S 为一维管道的距离变量；τ_0 为流段四周管壁的平均剪切力；$\frac{1}{g}\int_1^2 \frac{\partial v}{\partial t} dS$ 项为不恒定流动的惯性水头。当管道内的流动要素急剧变化时（水电站急剧增减负荷、水泵站快速启闭），常因管内液体的惯性作用导致管内压强的大幅度波动，从而产生水击现象（见管道水力瞬变）。

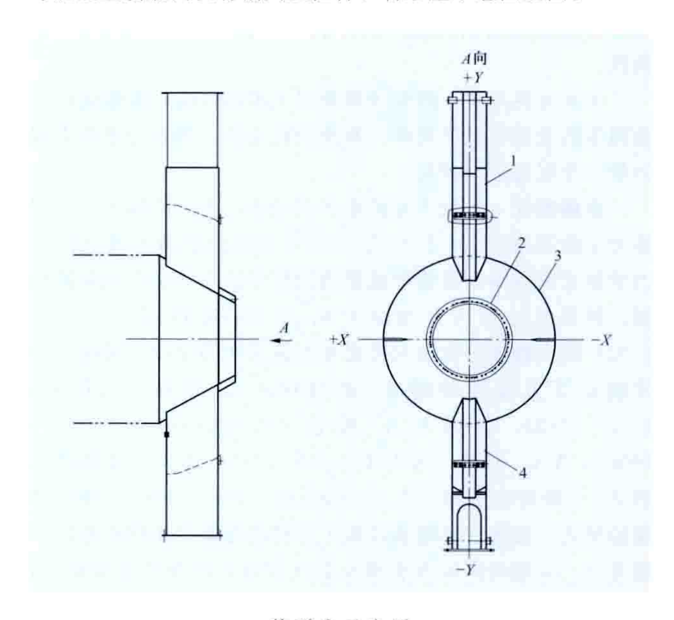
参考书目

清华大学水力学教研组．水力学．北京：高等教育出版社，1981.

guanxingzuo

管形座

（tubular support）　贯流式水轮发电机组的主要支撑部件，机组的正反向推力、径向力都通过其传递至混凝土基础，同时它又是水流通道。管形座的作用与立式机组座环类似。管形座由内管形壳、外管形壳、上部竖井和下部竖井组成，上、下竖井内设有爬梯和平台。内、外管形壳与混凝土接触面设有锚具及拉杆。管形座示意图见图。



管形座示意图

1—上部竖井；2—内管形壳；3—外管形壳；4—下部竖井

guanliushi shuilunji

贯流式水轮机

（tubular turbine; straflo turbine）

过流通道呈直线（或S形）布置的轴流式水轮机。贯流式水轮机使用水头范围一般为3～25m。

结构及特点　根据水轮机与发电机（见水轮发电机）连接和传动方式的不同，贯流式水轮机分为半贯流式和全贯流式两大类。半贯流式水轮机结构见图1，分为灯泡式、轴伸式和竖井式等，其中应用最为广泛的是灯泡式，轴伸式和竖井式多用于小型机。灯泡贯流式水轮机的发电机安装在灯泡体内部，水流从灯泡体四周流入水轮机转轮，从尾水管流出。发电机安装在转轮前的称为前置灯泡式，见图1(a)；发电机安装在转轮后的称为后置灯泡式，见图1(b)。轴伸式见图1(c)，它具有一个水平或略微倾斜的轴，发电机位于S形通道外，增速器布置在水轮机和发电机之间，小灯泡体内只设置轴承。竖井式的发电机安装在通入厂房的竖井内，在水轮机和发电机之间设置增速机，主要优点是节省灯泡体的钢材，发电机通风较好且检修、维护较方便，但机组段及厂房的尺寸增大，流道水流条件较灯泡式略差。灯泡贯流式

水轮机根据转轮叶片能否转动分为贯流转桨式和贯流定桨式，其中灯泡贯流转桨式水轮机应用最广，其主要部件包括引水室、转轮室、尾水管、管形座（亦称管形柱）、导水机构（含外导环、内导环、导叶等）、导叶调节装置、转轮、主轴、轴密封、导轴承、止推轴承等。其工作原理与轴流转桨式水轮机相似，但流道简单、水力损失小、平均效率高、过流能力大，在相同水头与出力条件下转轮尺寸较小，厂房及机组段土建工程也相对简单，与轴流转桨式比较，经济性较好。全贯流式水轮机结构见图2，它是将发电机转子直接安装在水轮机叶片外缘上，随转轮转动，流道平直，结构较紧凑，但发电机密封较复杂。

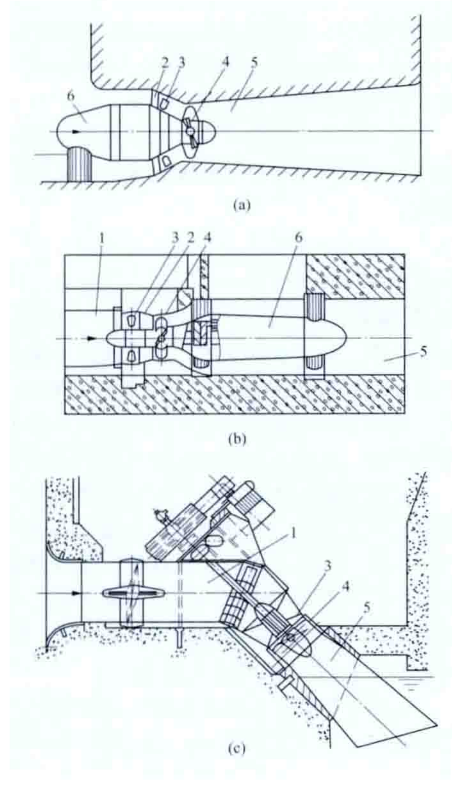


图1　半贯流式水轮机示意图

(a) 前置灯泡式；(b) 后置灯泡式；(c) 轴伸式

1—引水室；2—管形座；3—导水机构；4—转轮；5—尾水管；6—灯泡

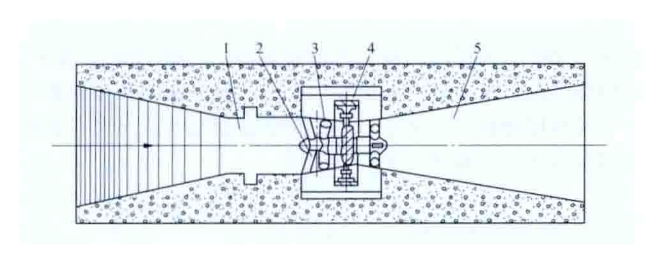


图2　全贯流式水轮机示意图

1—引水室；2—管形座；3—导水机构；4—转轮；5—尾水管

使用现状及发展趋势　贯流式水轮机中以灯泡贯流式水轮机发展最快，其发展趋势是大容量、高水头。输出功率最大的灯泡贯流式水轮机安装在巴西杰瑞水电站，部分机组由中国东方电机有限公司生产制造，单机额定输出功率为75MW，转轮直径7.9m。转轮直径最大的灯泡贯流式水轮机安装在美国悉尼墨雷水电站，转轮直径8.2m。最大的全贯流式水轮机安装在加拿大安娜波利斯潮汐试验电站，叶片为定桨式，转轮直径7.6m，额定水头5.5m，水轮机额定输出功率为17.8MW。中国已投入运行的额定功率最大的灯泡贯流式机组安装于桥巩水电站，水轮机额定功率为58.5MW，转轮直径7.4m，最大水头24.3m，额定水头13.8m；水头最高的是洪江水电站的灯泡贯流式机组，最大水头27.3m，额定水头20.0m，最小水头8.4m，水轮机额定功率46MW，转轮直径5.46m；转轮直径最大的是长洲水电站的灯泡贯流式机组，转轮直径7.5m，水轮机额定功率42.9MW，最大水头16m，额定水头9.5m，最小水头2.5m。

guanjiang

灌浆

灌浆　(grouting)　将具有胶凝性的固体颗粒浆液或化学溶液，按规定的浓度，用机械压力或浆液自重压力，通过钻孔或其他设施压送到岩石裂隙、砂砾石空隙、混凝土坝段间的接缝、岩石与混凝土接触带或其他需要灌浆的部位中，以达到充填、防渗、固结岩体或其他一些预期目的的一种工程技术。按灌浆作用，分为帷幕灌浆、固结灌浆（见图），接触灌浆、回填灌浆、接缝灌浆、混凝土缺陷或裂缝补强灌浆等；按灌浆材料，分为水泥灌浆、水泥黏土灌浆、水泥砂浆灌浆、黏土灌浆、化学灌浆等；按灌浆对象，分为岩石灌浆、砂砾石（或砂层）灌浆、混凝土灌浆、土体灌浆等；按灌浆压力，分为常压灌浆和高压灌浆（压力大于3MPa时）；按灌浆机理，分为渗入性灌浆和张裂式灌浆。

帷幕灌浆和固结灌浆在设计之前往往需在工地进行灌浆试验，以试验所得的成果作为制订设计和编制施工技术要求的主要参考资料。



向家坝水电站二期固结灌浆

施工方法　按分序加密的原则，帷幕灌浆和固结灌浆施工应按灌浆孔逐渐加密进行，每一个灌浆孔应单独进行灌浆；按灌浆浆液流动的方式分，有纯压式灌浆和循环式灌浆两种；按灌浆段施工的顺序分，有自上而下灌浆和自下而上灌浆等。

单孔灌浆的方法分为全孔一次灌浆和全孔分段灌浆两类。全孔一次灌浆适用于深度小于6m的浅孔，全孔分段灌浆适用于深孔。全孔分段灌浆按灌浆孔内各段的钻进和灌浆的相互顺序，又分为：①自上而下逐段灌浆法，适用于裂隙发育且较为破碎的岩石；②自下而上逐段灌浆法，适用于完整且裂隙少的岩石；③综合分段灌浆法，适用于岩石地质条件比较复杂且灌浆孔较深的情况；④孔口封闭、无栓塞、自上而下分段灌浆法（简称孔口封闭灌浆法），适用于大压力深孔灌浆施工。

灌浆强度值（grout intensity number，GIN）法是由瑞士学者隆巴迪（Lombardi）提出的一种设计和控制灌浆工程的方法，20世纪80年代开始在西欧和南美的某些工程中

开始使用，中国于1994年首次在黄河小浪底水利枢纽工程中应用。其含义为单位孔段上消耗的灌浆能量，可用灌浆孔段的最终灌浆压力 p（MPa）和单位灌段注浆量 V（L/m）的乘积表示，即 $GIN=pV$，控制的目标是使 GIN 为常数。严格地说，GIN法是一种控制灌浆过程的规定或程序，在灌浆方法上与其他灌浆基本相同。

施工程序　一般为钻孔—洗孔—冲洗—简易压水—灌浆。简易压水的主要作用是：①了解岩石的渗透性，以便采取相应的施工工艺和有效的技术措施；②随着灌浆次序的进展，了解灌浆效果。

灌浆压力　保证和控制灌浆质量，以及提高灌浆经济效益的重要因素。确定灌浆压力的原则是：在不破坏地基岩石构造和岩石上已浇筑的混凝土永久性建筑物的基础上，尽可能地提高灌浆压力。一般的做法是先利用公式计算出灌浆压力值，并参考同类地质条件和同类工程使用的压力值，初步选定，再通过灌浆试验予以验证并调整，而后在设计时最终确定。

灌浆浆液　在岩石中进行帷幕灌浆和固结灌浆时常采用纯水泥浆液或水泥基质浆液。水泥的细度是影响灌浆质量的关键性因素，颗粒越细，越易灌入微细裂隙。通常使用强度等级为32.5或以上的水泥，要求其通过80μm方孔筛的筛余量大于5%。水泥浆液应均匀、稳定，并具有良好的流动性，水泥结石应具有一定的强度。当吸浆量很大时，常采用水泥砂浆。砂子应质地坚硬、级配均匀，粒径不宜大于2.5mm，细度模数不宜大于2。

灌浆记录　灌浆施工过程中的记录多采用灌浆自动记录仪，以提高工作效率和保证工程质量。灌浆自动记录仪是一种自动化监控系统，其作用是在灌浆过程中，自动完成灌浆压力、流量、水灰比及注入水泥总量的数据采集与处理；在压水过程中，记录压力和流量，计算出压水点的吕荣值。20世纪80年代末，中国开始引进瑞典、瑞士、法国的灌浆记录仪，而中国采用灌浆自动记录仪始于20世纪90年代初。

guanjiang jixie

灌浆机械　(grouting machinery)　用来搅拌与压送浆液并对灌浆过程进行记录的机械设备。包括灌浆机、浆液搅拌机以及与之配套的智能灌浆记录仪。

灌浆机　用于浆液加压、输送的设备，即灌浆泵。在水泥灌浆中使用最多的是往复式柱塞泵，此外还有螺杆泵、高喷泵、全液压灌浆泵等。往复式柱塞泵又分为泥浆泵和砂浆泵两种。在化学灌浆中多采用计量柱塞泵。

(1)泥浆泵。分卧式与立式两类，缸体多数为双缸或三缸。常用的水泥灌浆柱塞泵有多种型号，输送压力一般为1.5～6.0MPa，大者达12MPa；输浆流量为50～300L/min，大者达850L/min。

(2)砂浆泵。可以灌注水泥浆和水泥砂浆，砂的粒径宜小于2mm。常用的100/15型砂浆泵最高工作压力为1.5MPa，输浆流量为100L/min。

(3)计量柱塞泵。又称比例泵，是一种行程可以调节的单作用柱塞泵，它可按比例同时分别输送两种不同的化学溶液或固体颗粒浆液，主要用于化学灌浆和水泥、水玻璃双液法灌浆。灌浆压力一般为1.5～3.0MPa，输浆量为12.5～60L/min。

浆液搅拌机　专为灌浆时搅拌水泥浆用的机械，也可用来搅拌灌浆用的水泥砂浆和水泥黏土浆，有立式与卧式两种。常用的是立式双桶浆液搅拌机，转速较慢，一般桶的容积为200L，也有自制成300L或500L的。在输浆量较大的灌浆作业中，宜采用卧式连续式水泥浆搅拌机，其容积多为1～2m^3。此外还有高速搅拌机，转速大于1200r/min，主要用于拌制细水泥浆液和稳定浆液。

智能灌浆记录仪　可以自动采集、显示、记录、打印灌浆过程中的有关参数，是灌浆施工中应用的一种自动化监控系统。

guangmian baopo

光面爆破　(smooth blasting)　沿设计开挖周边线钻孔装药，采用毫秒爆破，在开挖区主爆破孔之后起爆，使开挖面沿周边孔连线破裂，以获得比较平整壁面的爆破技术。光面爆破可减轻爆破对保留岩体的破坏，开挖面的岩石壁面平整、超挖少，为采用锚喷支护提供基本条件。

光面爆破的基本原理是控制炸药作用，使猛度做功形式更多地转化为爆力做功形式，降低了炸药爆炸的初始冲量，从而减少了对炮眼壁岩体的破坏，并控制爆破裂缝沿预计方向发展。通常是根据不同岩层情况，通过合理选择炸药、装药结构、周边孔爆破参数（炮孔间距 a、最小抵抗线 W、线装药密度 Q_x等）措施来实现的。

光面爆破作业及参数选择：①沿开挖轮廓线钻周边孔，钻孔直径 d 在深孔爆破时一般为80～100mm，浅孔爆破时为42～50mm。光爆孔最小抵抗线 W_{min} 一般取（10～20）d。光爆孔孔距 a 一般取（0.6～0.8）W_{min}。②宜采用低猛度、低爆速、传爆性能好的炸药。根据钻孔直径和岩石的类别确定线装药密度，即每米孔深的装药量。③采用药卷直径（d）小于钻孔直径（D）的不耦合装药结构，不耦合系数（D/d）一般应大于2，最小不得小于1.5；为了克服孔底部的夹制阻力，孔底部应适当加大装药量；堵塞长度一般为炮孔深度的1/4～1/3。④周边光爆孔在主爆区炮孔之后起爆，在需要控制一次起爆炸药量的地方，若光爆孔很多，可以采用分段起爆。各段之间用毫秒雷管起爆。⑤在开挖实践中，光面爆破前，需通过现场试验，确定光面爆破的各项参数。

光面爆破技术以获得岩体平整壁面为目的，水电工程地下洞室及露天岩基开挖中广泛应用。

Guangzhou Choushui Xuneng Dianzhan

广州抽水蓄能电站　(Guangzhou Pumped Storage Power Station)　位于中国广州市从化县吕田镇，距广州市直线距离90km。上水库位于召大水上游的陈禾洞小溪上，下水库位于九曲水上游的小杉盆地，见图1。上、下水库间距离约3km，水位落差约500m。装机容量2400MW，分两期建设，一、二期工程各装机1200MW，为20世纪世界上装机容量最大的抽水蓄能电站。电站以3回500kV输电线路接入广东电网，配合大亚湾核电站的安全稳定运行，解决广东电力系统调峰填谷的需要，并担负系统的事故备用、调频、调相等任务。

枢纽布置　枢纽工程由上水库、下水库、水道系统、厂房等组成，见图2。

上水库　坝址以上流域面积5km^2，多年平均流量

0.209m³/s。水库正常蓄水位一期工程为810.00m，二期抬高到816.80m，相应库容分别为1700万m³和2406万m³；死水位797.00m，相应库容700万m³；调节库容一期1000万m³，一、二期共1716万m³。大坝为混凝土面板堆石坝，最大坝高68m，按10000年一遇洪水校核；左岸设有岸边侧槽式溢洪道，宽40m。



图1　广州抽水蓄能电站下水库

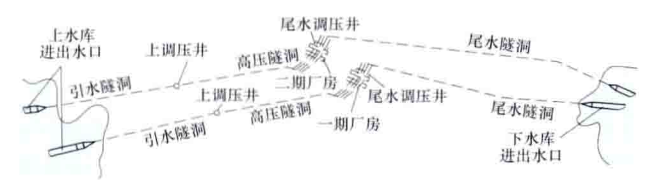


图2　广州抽水蓄能电站枢纽布置图

下水库　坝址以上流域面积13km²，多年平均流量0.544m³/s。水库正常蓄水位一期工程为283.00m，二期抬高到287.40m，相应库容分别为1750万m³和2340万m³；死水位275.00m，相应库容750万m³；调节库容一期1000万m³，一、二期共1711万m³。大坝为碾压混凝土重力坝，最大坝高43.3m，按10000年一遇洪水校核，溢流坝段设两孔宽9m的溢流孔。

水道系统　由上、下水库进/出水口，引水隧洞，上、下调压井，尾水隧洞等组成。输水线路一期工程长3858m，二期总长4438m，均采用一洞四机布置。上平段洞径9m，分别长925.77m和883.5m，与上调压井相接；调压井后为两级斜井和中平段，一期总长1066.22m，二期总长902m，洞径8.5m，下弯段后为设计水头高达775m的钢筋混凝土岔管，直径为3.5～8.0m，其后用4条直径为3.5m的钢支管进入厂房与水泵水轮机连接。尾水洞一、二期各设一条，洞径9m，一期总长1521.01m，二期总长2190.34m，均设有两个尾水调压井。上、下调压井均为阻抗式。

厂房　地下式厂房。一、二期工程厂房长146.5m，宽21m，高分别为44.54m和47.65m。各安装4台单机容量为300MW的竖轴单级混流可逆式水泵水轮机和发电电动机组。水泵水轮机转轮直径3.985m，转速500r/min，吸出高度−70m。发电工况：最大、最小水头一、二期工程分别为537.18m和504.29m及535.64m和497.6m；额定出力分别为347.7MW和350.3MW。抽水工况：一、二期工程最大、最小扬程分别为550.01m和514.14m及552.8m和514.5m，最大扬程时输入功率分别为326.08MW和325.8MW。发电电动机为竖轴三相空冷半伞式，额定电压18kV，发电时，单机容量为300MW，功率因数为0.9；抽水时，功率因数为0.95。采用自并激晶闸管静态励磁。电动机起动采用静止变频器和背靠背同步起动两种方式。

一期工程主变压器室长114.24m，宽17.24m，高27.4m；二期工程主变压器室长138.07m，宽17.24m，高17.6m。主变压器室内均装有单台容量为340MV·A的500kV强油水冷三相变压器4台。一期500kV气体绝缘密封电器布置于地下，500kV出线2回，用电缆经出线洞引出；二期工程开关站布置于户外，长102m，宽55.5m，500kV出线1回。

工程施工　电站一期工程于1988年9月开工，第一台机组于1993年8月发电；二期工程于1994年9月开工，1998年7月第一台机组发电。2000年竣工。

主要工程量：一、二期工程的主体工程量分别为：土石方明挖149万、77.12万m³，石方洞挖86万、94.72万m³，混凝土25万、19.12万m³，土石方填筑31万、33.24万m³，钢材1.38万、1.096万t。

设计单位　广东省水利电力勘测设计研究院。

建设单位　广州抽水蓄能联营公司。

guifen

硅粉　(silica fume)　工业电炉在高温熔炼工业硅及硅铁的过程中，随废气逸出的烟尘经收尘装置收集而得的粉尘。硅粉的颗粒极细，主要成分为二氧化硅，化学成分稳定，是一种活性掺合料。

掺入混凝土中的硅粉具有良好的活性及微粒填充效应，可改善混凝土的孔结构和密实性，减少泌水，加大黏聚性与可泵性，还能提高混凝土抗硫酸盐及氯盐侵蚀的性能。掺硅粉的混凝土具有抗压强度较高、抗冲耐磨、抗空蚀等性能。

硅粉掺量宜控制在胶凝材料总量的10%以内。由于其需水量大，常要求配用减水剂。它和其他掺合料一样，为保证其在混凝土中的均匀性，要求搅拌时间延长0.5～1min。必须湿养护，养护时间一般为28天。

guoyu jianzhuwu

过鱼建筑物　(fish pass structure)　在闸坝或天然障碍等处修建的用于辅助和引导鱼类洄游的通道，为有洄游生殖或育肥习性的鱼类而设。过鱼建筑物还需考虑诱导、集鱼和观测等辅助设施。

过鱼建筑物主要有鱼梯、仿自然旁通道、鱼闸、集运系统等，应进行综合比选确定。

鱼梯　也称鱼道，是最常用的一种过鱼建筑物，一般呈连续阶梯状的水槽形式，主要包括池式鱼道、槽式鱼道和鳗鱼梯等。

仿自然旁通道　人工修建的绕过堤坝的仿自然溪流，为鱼类提供洄游通道。与鱼道一样分为进口、通道和出口三部分，多用于中小型河流。

进口宜靠闸坝或发电尾水附近，满足旁通道的坡度要求，进口呈喇叭形布置，便于鱼类进入通道。进口底部必须与河床、河岸基质相连，使底层鱼类也能进入。

通道断面形状多样，坡降平缓，底坡和边坡采用植物与

岩石混合结构生态防护，通道内水深应能满足鱼类洄游需要。

出口应远离泄水闸、船闸及取水口，水流平顺，流向明确，以便鱼类沿着水流和岸边线顺利上溯。出口应能适应上游水位变化，与上游水面衔接良好，并有足够的水深。

鱼闸　由下游水槽、闸室、上游水槽等组成，利用上、下游两座闸门调节闸室内水位变化而过鱼，运行原理与船闸类似。鱼闸一般应用于上、下游水位变幅较大的中高水头的工程。鱼闸可设置旁道补水系统，进入下游水槽的辅助水流流速宜小于水槽内的流速，避免影响鱼类上溯行为。

集运系统　通过人工集鱼和运输的手段实现鱼类过坝的措施，由集鱼设施和运鱼设施两部分组成，主要形式有集鱼升鱼机、集鱼转运设施和集运鱼船等。集鱼设施包括可连续集鱼的集鱼平台和间断性集鱼的集鱼船。主要方法有水流吸引、光声等因素诱导、人工捕捞、利用生物和物理屏障导拦等。集鱼位置应处于鱼类的洄游路线中，且处于鱼类在坝下集群的位置，集鱼的周期和频次应符合过鱼对象的生活习性。

guoyu sheshi

过鱼设施

过鱼设施　（fish pass facilities）　人工辅助鱼类通过水电站闸坝等障碍物的设施或技术措施。让鱼类繁殖群体越过大坝，为亲鱼繁殖、鱼卵孵化、幼鱼索饵，以及幼鱼和繁殖后的亲鱼降河等创造条件，也为大坝上下游鱼类种群的基因交流提供条件。有效的过鱼设施，可减小大坝对鱼类造成的不利影响。

过鱼设施分为上行过鱼设施和下行过鱼设施。

上行过鱼设施　上行过鱼设施有过鱼闸（窗）、鱼道、鱼闸、升鱼机、集运鱼船、仿自然旁通道和特殊鱼道。

过鱼闸（窗）　在与江河隔离的湖泊、河道闸门处，适时打开过鱼闸（窗）纳入鱼、蟹苗种，补充水产资源的方法称开闸（窗）纳苗。纳苗方法有两种，一种叫“顺灌”，另一种叫“倒灌”。每当汛期，当闸外水位高于闸内水位时，开启闸（窗）使闸外鱼、蟹苗种随水流入的纳苗方法叫顺灌。汛期过后，到下次汛期来临之前，闸内水位高于闸外水位，开闸时闸内水往外排放，幼鱼或成鱼逆流而上的纳苗方法叫倒灌。过鱼闸的纳苗量与汛期径流量及鱼、蟹苗种类、数量密切相关，缺点是水多苗少。

鱼道　在闸坝或天然障碍处为沟通鱼类洄游通道而设置的一种过鱼建筑物，一般布置在低水头闸坝上。按结构可将鱼道分成两大类，即槽式鱼道和池式鱼道，见图1、图2。

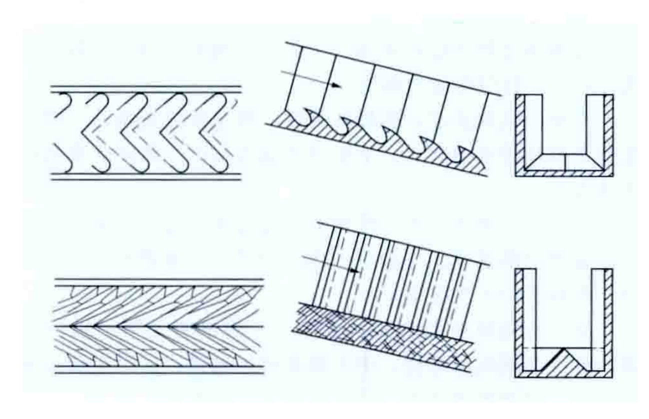


图1　槽式鱼道平面、纵断面、横断面图

(1) 槽式鱼道。一种连接上、下游的斜槽，槽内沿边壁或底壁设置各种形式的加糙部件，以增加水流阻力，减缓流速，便于鱼类向上溯游。槽式鱼道结构简单，节省费用，仔幼鱼易于降河；但鱼道流速大，无休息池，只能建在低水头闸坝处，适用于鲑鱼、鳟鱼。

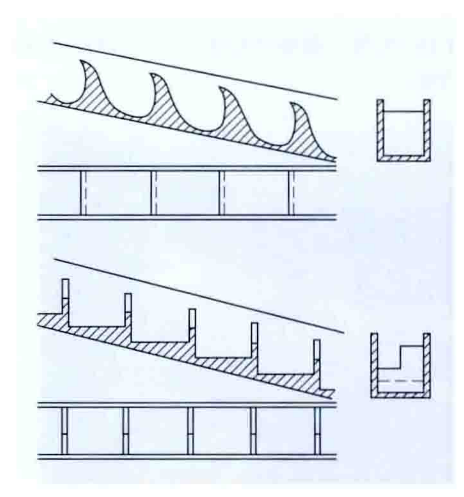


图2　池式鱼道平面、纵断面、横断面图

(2) 池式鱼道。用一定形式的隔板间隔成多个水池的一条过鱼水道，各水池间具有一定的水位差，组成多级池梯。池式鱼道结构复杂，费用较高，池室多的可设休息池。池式鱼道流速小，鱼类易上易下，但流态复杂，常使上溯鱼类延搁太久。

鱼道的主要优点在于过鱼性能好，运转不易出故障，提升高度小，若隔板设计合理（过鱼孔流速小，消能充分，流态和休息条件好），上、下游水位变动时池室水流稳定，水量充分，过鱼数量就大，同时还具有结构简单，便于施工和维修管理等优点；缺点是提升高度越大，鱼道越长，投资很大；固定的进出口不易适应水位大幅度变化。如果改建成不同水位条件下的多个进出水口，过鱼效率将会大大提高。

鱼闸　运作原理与船闸相同。一般有两个相邻闸室，上、下两端闸门交错启闭进行过鱼。运转一周约1h。适宜建在水头为10～60m的坝上。鱼闸过鱼省力、省时，适用于游泳能力差的鱼类。一般认为每级为6m左右，高水头可采用多级闸室。占地少，但容纳鱼数量大，并可与船闸并用，造价低。过鱼不连续，仅适用于过鱼量不大的枢纽。鱼闸机动设备多，维修费用高。

升鱼机　适宜建在高坝上，基本形式有两种，一种是单线，一种是双线。在升鱼机内，鱼类被直接引入一个鱼笼内。当鱼笼上升时，鱼类及底部少量的水也被举起，直到鱼笼到坝的顶端。在坝的顶端，升鱼机底部向前倾斜并把里面的鱼和水倒入前池中。升鱼机每次过鱼多少，取决于气候条件，附近机组运行情况，且不能连续过鱼，仔幼鱼无法通过升鱼机降河。

集运鱼船　即浮式鱼道，可移动位置，适应下游流态变化，移至鱼类高度集中的地方诱鱼、集鱼。由集鱼船和运鱼船两部分组成，即由两艘平底船组成一个鱼道。集鱼船驶至鱼群集区，打开两端，水流通过船身，并用补水机组使其进口流速比河床中大0.2～0.3m/s，以诱鱼进入船内，通过驱鱼装置将鱼驱入紧接其后的运鱼船，即可通过船闸过坝后将鱼放入上游。集运鱼船集鱼方式灵活、机动，可以双向过鱼；缺点是不能够连续过鱼，人为因素对过鱼效果影响较大，过坝鱼类成活率受人为因素影响较大。

仿自然旁通道　一般分为进口、通道和出口三部分，可

单独使用，也可与其他过鱼构筑物相结合，形式和形状可多样。仿自然旁通道应尽量利用或改造工程区现有溪流、沟渠或废弃河道等，增加鱼类栖息地面积，减少占地和工程成本。仿自然旁通道比较接近自然状态，受地形地貌影响较大。

特殊鱼道　为特殊对象而设，如香鱼道、鳗鱼道等。香鱼道为幼香鱼梯，兼捕幼香鱼。鳗鱼道是一种独特装置，在各形式鱼梯侧墙设置用石堆筑鳗洞，或建筑成特殊结构的鳗鱼梯。特殊鱼道只针对特殊的鱼类过坝需求。

下行过鱼设施　下行过鱼设施有栅栏、行为障碍、带有表面棒状支架或深层入口（鱼道入口）的栅栏。下行过鱼设施的研究比较薄弱，有待进一步提高。

栅栏　为阻止鱼类经过叶轮机，可在水管入口处安装一个栅栏。栅栏要设置很多小网眼，且必须将鱼引向一条鱼道入口处。栅栏沿对角线方向安装在水流中，并将鱼道入口安装在栅栏的下游部分。

行为障碍　通过一定行为障碍将鱼类引至鱼道入口的设施，如视觉的、听觉的、电力的和水力的刺激可以产生大量的阻碍。一般有泡沫屏障、声音屏障、固定和可活动的链形屏障、光学屏障、电力屏障和水力（天窗）屏障。比较适用于特定行为的鱼类。

带有表面棒状支架或深层入口（鱼道入口）的栅栏　对于小型水利水电工程，采用与现存的常规排污架或成角度的条形支架相连的鱼道入口，这些结构性的引导装置对大型鱼体形成实物栅栏，而对幼体形成行为屏障物。这种鱼道入口的效率同鱼体大小与空间的比例，以及鱼类对结构前段周围和旁道入口处的水利条件的反应密切相关。

简史　人们很早就在河道里开凿礁石，疏浚急滩等天然障碍，沟通水道，减缓流速，以利洄游鱼类的溯河降河。早期的过鱼设施，常常是在岩石上开凿水池式斜槽，供溯流鱼逐级缘梯而上，故称鱼梯。最早的鱼道设在水堰处（工业革命期间）和自然跌水处。这也许是鱼道的雏形。后来流行木鱼梯，内设隔板以减缓流速。后期兴建的过鱼设施多为钢筋混凝土结构。

中国鱼道的主要过鱼对象，一般是鲤科鱼类和鳗、蟹等幼苗，个体较小，克服流速能力小，对复杂流态的适应性差。中国过鱼设施研究始于 1958 年，浙江富春江七里泷电站首次设计了鱼道，最大水头 18m。小型鱼道修建在低水头闸堰上，如江苏省浏河闸鱼道，建于 1959 年，水头 1.4m，全长 101m，宽 2m，33 个池室，间隔 2.5m，主要过鱼对象为幼鳗、幼蟹、青鱼、草鱼、鲢、鳑等中小型鱼。过鱼设施设计才 60 多年历史，已建成鱼道 50 多座，并在沿江、沿海闸门上开设过鱼窗或过鱼闸门，以便“灌江纳苗”。

在欧洲，修建鱼道的历史有 300 多年。1662 年，法国西南部的贝阿省曾颁布规定，要求在坝、堰上建造供鱼上下行的通道。当时已有一些简单的鱼道。19 世纪末到 20 世纪初，挪威人 Landmark 和比利时人丹尼尔（Denil）对斜槽加糙物进行长期研究，其中丹尼尔式鱼梯被广泛采用。

参考书目

陈凯麒，常剑波，等．建设项目环境影响评价鱼类保护（鱼道专题）技术研究与实践．北京：中国环境科学出版社，2012.

李志华，王柯，刘绍平，等译．鱼道——设计、尺寸及监测．北京：中国农业出版社，2009.



Hai He shuixi shuineng ziyuan

海河水系水能资源 (hydropower resources of Haihe River System) 据《中华人民共和国水力资源复查成果(2003年)》统计，海河水系水能资源理论蕴藏量为191.18亿kW·h/a，占中国水能资源的0.31%；其中技术可开发资源装机容量1502.8MW，多年平均年发电量34.03亿kW·h，占中国水能资源的0.14%。

海河水系流域面积26.4万km²，河流分散，主要包括潮白河、永定河、大清河、子牙河和漳卫河等支流。各支流相继汇合，至天津市始称海河注入渤海湾。各支流发源于燕山和太行山，水能资源集中于各支流上游的峡谷段，由于河道短、流域面积小、径流量较少，技术可开发的水电站全部为中小型。已建的密云、官厅、岗南和黄壁庄等水库，均以防洪、灌溉、供水为主结合发电。

hetongjia

合同价 (contract price) 在经济活动中由发包人、承包人根据国家相关规定通过招投标或其他方式，以合同形式确定的承包价，包括签约合同价和合同价格。签约合同价为签订合同时合同协议书中写明的，包括了暂列金额、暂估价的合同总金额；合同价格为承包人按合同约定完成了包括缺陷责任期内的全部承包工作后，发包人应付给承包人的金额，含履行合同过程中按合同约定进行的调整、变更和索赔。

合同价内容 包括合同总金额、合同内各单项的单价和合价、支付方式、价格调整、合同变更计价原则等。

合同价种类 分总价合同、单价合同和成本加酬金合同等。①总价合同。适用于数量小且较精确、技术简单、工期短和风险小的项目。可分为固定总价与可调总价合同。固定总价在履约期间合同价格不予调整。可调总价在履约期间因物价波动或其他约定条件变化总价可进行调整。②单价合同。其合同数量是可以变化的，以实际完成数为准。可分为固定单价和可调单价合同两种。固定单价在合同履行期间不变，可调单价在合同履行期间按约定条件可以调整。③成本加酬金合同。合同价格按承包人成本加一定比例酬金确定，适用于风险较大的项目。

合同变更 合同履行期内双方协商一致的合同内容变更，包括工程变更（合同项目、质量标准、工期、施工工艺等变化范围超出合同的约定）、合同条件和条款变更。合同变更引起的合同价变化，处理程序与计价从其合同约定。当合同当事人一方因对方不履行或未正确履行合同等而直接或间接受到经济损失与权利损害，通过合同规定的程序向对方提出经济或工期补偿要求的行为属于索赔范畴而非合同变更。

hechuangshi changfang

河床式厂房 (water retaining power house) 位于天然或人工开挖的河道上兼有壅水作用的水电站厂房。一般适用于水头小于50m的水电站。

大中型水电站河床式厂房多安装立轴轴流式机组或灯泡贯流式机组，后者适用于水头范围为5～30m的水电站。安装立轴轴流式机组的河床式厂房的过流部分由进水口、钢筋混凝土蜗壳（有的带有钢板里衬）和肘形尾水管组成，见图1。主厂房上部配备供机组安装及检修使用的桥式起重机。上游挡水高程按挡水建筑物的要求确定，进水口要淹没在上游发电最低水位以下一定深度，设有拦污栅和闸门，工作平台上配备有启闭机。进水口至蜗壳入口的流道以及肘形尾水管的扩散段需要的过水断面面积大，结构上通常要增设1～2个分流支墩，将过水断面分成两孔或三孔。尾水管出口段设有尾水闸门和配套的启闭操作机械。有的小型水电站也采用开敞式进水室和竖直尾水管。

有的河床式厂房兼有泄洪和排沙作用，布置形式有：①泄洪排沙底孔进口设在混凝土蜗壳下面，出口设于尾水管上面，如中国长江葛洲坝水电站厂房，其泄洪排沙底孔的工作闸门设在出口，进口仅设检修闸门。泄洪期间由于射流效应使尾水管出口水位低于下游洪水位，因而增加一些出力，但射流作用也使尾水渠流态复杂化。②为了增加水电站泄洪

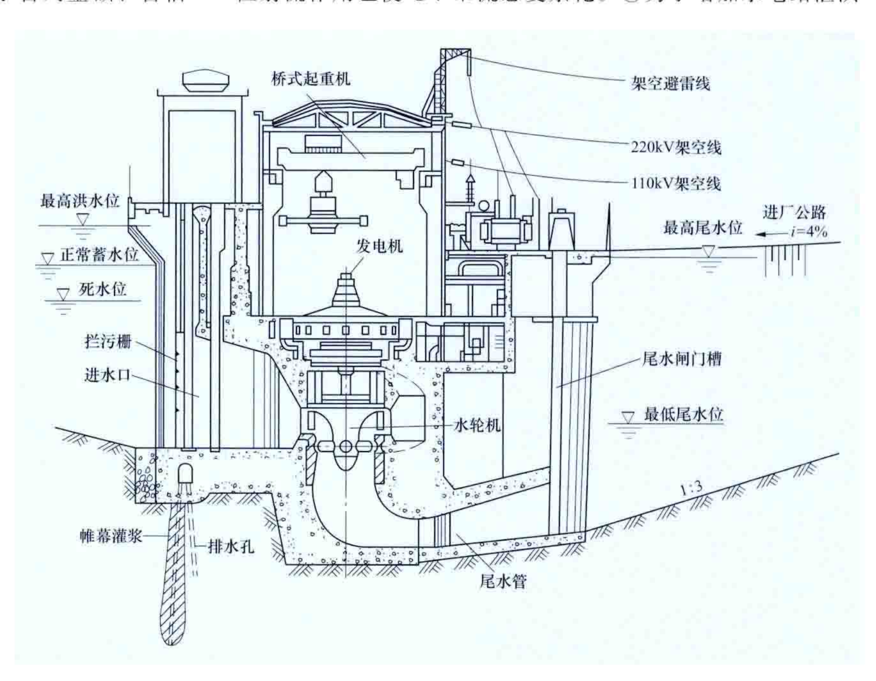


图1 河床式厂房横剖面

能力，在混凝土蜗壳上面设置泄水道，如俄罗斯伊尔库茨克(Irkutsk)水电站厂房。③溢流坝段与机组段相间布置，如中国青铜峡水电站厂房，见图2。



图2　青铜峡水电站河床式厂房

20世纪60年代后，贯流式水轮机得到快速发展。贯流式水轮机通常为卧式布置，没有蜗壳，转轮安装在引水管道内，通过连轴或同轴与发电机联动。若发电机也安装在引水管道内，水流从发电机外壳流过，则称为灯泡贯流式机组(见图3)。世界上最大的灯泡贯流式机组安装于巴西杰瑞(Jirau)水电站，单机容量达75MW；中国最大的灯泡贯流式机组安装于四川沙坪二级水电站，单机容量为58MW。

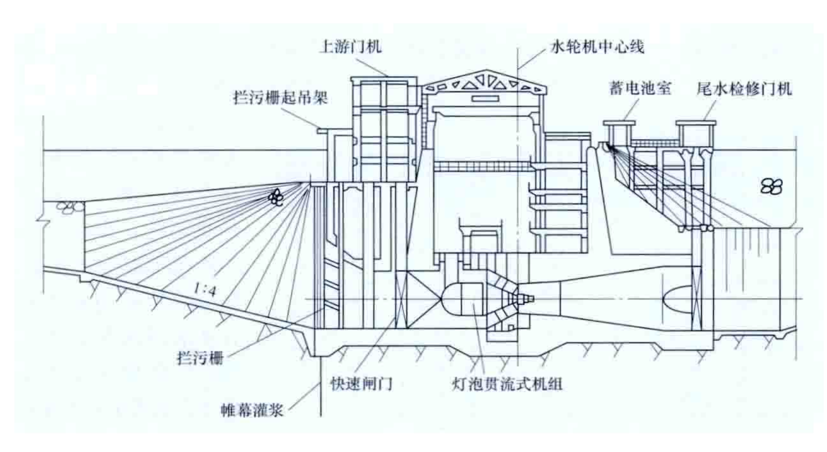


图3　灯泡贯流式机组厂房横剖面

河床式厂房横跨河道，常常成为连接两岸的通道，采取加宽厂房上游进水口工作平台或尾水平台的措施来架设交通桥。进厂方式多由下游交通直抵安装间，尾水位变幅大的水电站多采用竖直交通运输。副厂房常布置在进厂交通入口处，主变压器多布置于尾水平台上，开关站可设在岸边。也有的将副厂房布置在主厂房的下游侧，主变压器场布置于进厂交通道的近旁，开关站设在厂房屋顶或河岸，均可按照地形、地质和交通条件灵活布置。

hechuangshi jinshuikou

河床式进水口　(intake of water retaining power house)

与水电站厂房连为一体、整体布置的进水口，是河床式水电站挡水建筑物的一部分(见河床式厂房)。由进水流道和拦污栅、检修闸门、工作闸门及坝顶门座式起重机等上部结构组成。其中，轴流式机组进水口应设置检修闸门、事故闸门和拦污栅，但中小型电站进水口的检修闸门可与拦污栅共槽；对于灯泡贯流式机组，当厂房尾水设有事故闸门时，进水口仅需设置检修闸门和拦污栅。由于进水口至蜗壳入口的流道断面尺寸较大，通常要在进水口增设1～2个分流支墩。为便于布置闸门和拦污栅，一般在坝前向上游伸出悬臂牛腿和墩墙。拦污栅设在喇叭口上游端，可布置成一孔一栅，也可布置成通仓拦污栅。大型水电站为满足过栅流速要求，一般布置成通仓拦污栅，既可增大过流面积，又可在拦污栅部分堵塞时不影响各进水口的引水。

拦污栅及闸门一般由设在坝顶上的门座式起重机操作。为保证在动水中下门的要求，事故闸门(快速闸门)一般由专设的液压启闭机操作。

在多泥沙河流上，应结合枢纽布置，在进水口前或进水口底坎高程下设置冲沙廊道或冲沙底孔等防沙设施，以解决泥沙对发电的影响。

hechuang yanbian

河床演变　(riverbed evolution)　在水流、泥沙的作用下，河床的形态及其变化过程。它既包括天然情况下的变化，也包括在人类活动的影响下的再造床过程。水流与河床构成一个矛盾的统一体，水流作用于河床，使河床发生变化，河床的变化又反过来影响水流，它们相互依存、相互影响，永远处于变化和发展的过程中。

研究内容　河床的形态变化是地表在内营力和外营力共同作用下长期发展的产物，是在水流的动力作用和地质构造的影响下的结果。研究河床演变，既要研究其历史演变，更要研究其现代过程。河床在水流作用下的变化是由组成其边界的物质的冲刷、输移和沉积过程所引起的。河流的动力结构、不同水流条件下泥沙的运动规律，决定着河床形态发生和发展的内在机理。研究河床演变的学科称为河床演变学，是一门介于河流动力学和河流地貌学之间的学科。

冲积河流自动调整机理　按照河流所处的地理位置，可以把河流划分为山区河流与平原河流。平原河流是指自山区进入平原以后的河流，多为冲积河流，河床多由河流所挟带的泥沙冲积而成。冲积河流具有自动调整的作用，它一方面使来自上游的水和泥沙通过河段下泄，河流保持相对平衡；另一方面则使河流的能量消耗服从一定的规律。冲积河流的自动调整有两个方面：①河床的纵向调整(纵剖面的塑造和纵向冲淤变化)。取决于床沙质来量和水流挟沙力之间的对比关系。随着河床的淤积和冲刷，床沙组成作出相应的调整。②河床横向调整(断面形态变化和平面变形)。取决于河岸抗冲性和水流冲刷能力之间的对比关系。经过长期调整，在特定条件下河型发生变化。冲积河流的自调整作用既有确定性(平衡倾向性)，也有随机性。同一类型的河流的平均情况往往有很多相似之处，又没有两条河流是完全一样的。

人类活动的影响　随着人类文明的发展，出于兴利除害

的需要，人们越来越频繁地对河流进行多种不同规模的改造。世界上已很少有河流还保持其原始状态。当河流因人类活动而发生改变后，河流将做出相应调整，这种调整有时还很剧烈。在人类活动中，对河流造成最深远影响的是在河流上修建大坝。大坝抬高了天然河流的水位，使泥沙在库区大量落淤，并逐渐形成适应新的边界条件的新河道，使上游来沙能够通过水库下泄。这是水库上游再造床的全过程。修建水库以后，水库下游的水沙条件发生了变化，也会导致水库下游河床的再造床调整。

参考书目

钱宁，张仁，周志德．河床演变学．北京：科学出版社，1987.

heliu

河流 (river) 见水系。

heliu nisha

河流泥沙 (river sediment) 河流中随水流输移或在河床、滩地上发生冲淤的岩土物质颗粒。岩石风化后的岩土是河流泥沙最主要的来源。当暴雨降到流域地表，在产流和汇流过程中，侵蚀坡地及沟壑的岩土，经水流输移到河流，形成河流泥沙。河流在流动过程中，还会冲刷河床或河岸，进一步增加泥沙量。当河流进入下游平原区时，比降减小，流速减缓，水流挟带的部分泥沙将沉积在河床或滩地。河流在入海口附近因流速锐减，泥沙将沉积在河口附近海域。

河流泥沙可以形成广阔肥沃的土地，提供丰富的建筑材料，为人类造福。但河流挟带过多的泥沙，以及人为干预改变河流流态，可能会造成河道、湖泊及水库淤积，减小过流能力，降低防洪、发电、灌溉、航运等效益，从而给水资源开发利用带来一系列问题。

研究水流中泥沙的冲刷、输移和沉积过程的学科，称为河流泥沙动力学。河流泥沙工程学则是在水利水电、航运和交通等建设中逐渐形成的一门应用学科，它以河流泥沙动力学为基础，主要研究与工程有关的泥沙问题。

泥沙物理性质 主要是几何特性和重力特性。几何特性包括泥沙颗粒形状、大小及群体组成。泥沙颗粒的大小用颗粒的直径表示。泥沙形状不规则，粗颗粒常用三轴平均粒径表示，细颗粒用沉降粒径表示。河流泥沙皆为大小颗粒混合的群体，用级配（小于某粒径的泥沙质量占全部泥沙质量的百分数）曲线表达泥沙颗粒组成特性。泥沙重力特性为颗粒的容重和沙样的干容重。容重是泥沙颗粒单位体积的重量，采用国际单位为 N/m^3。工程界习惯采用的单位为 t/m^3，按国际标准单位应理解为密度。构成泥沙的矿物成分不同容重也不一样，一般为 2.6～2.7t/m^3。干容重为单位体积原状沙样烘干后的重量。它与颗粒容重的差别取决于沙样的孔隙率。

泥沙运动基本规律 包括泥沙的沉降、泥沙的起动、河流的沙波运动、河道阻力、推移质运动、悬移质运动以及水流挟沙力等。河流泥沙运动的特殊形态还有高含沙水流、泥石流、异重流和波流作用下的泥沙运动等。

世界各大河流的挟沙情况（按含沙量顺序排列）

序号	河流	国别	流域面积①(km^2)	年水量(亿 m^3)	年沙量(亿 t)	平均含沙量(kg/m^3)
1	黄河（潼关站）	中国	682 200	349.9	11.1	31.8
2	科罗拉多河②	美国	637 000	49	1.35	27.5
3	辽河（六间房站）	中国	136 500	30.3	0.048	1.59
4	恒河②	印度、孟加拉	955 000	3710	14.51	3.92
5	密苏里河②	美国	1 370 000	6160	2.18	3.54
6	印度河②	巴基斯坦	969 000	1750	4.35	2.49
7	布拉马普特拉河②	孟加拉、印度	666 000	3840	7.26	1.89
8	尼罗河②	埃及、苏丹	2 978 000	892	1.11	1.25
9	红河②	越南	119 000	1230	1.30	1.06
10	伊洛瓦底江②	缅甸	430 000	4270	2.99	0.70
11	密西西比河②	美国	3 220 000	5610	3.12	0.56
12	湄公河②	老挝、泰国、柬埔寨、越南	795 000	3480	1.70	0.49
13	长江（大通站）	中国	1 705 400	9034	4.14	0.461
14	西江（高要站）	中国	351 500	2200	0.68	0.309
15	顿河③	俄罗斯	422 000	280	0.06	0.23
16	尼日尔河③	尼日利亚	1 112 000	1800	0.40	0.22
17	多瑙河③	德国、奥地利、斯洛伐克、匈牙利、克罗地亚、塞尔维亚、保加利亚、罗马尼亚、乌克兰	1 165 000	2000	0.28	0.14
18	伏尔加河③	俄罗斯	1 500 000	2500	0.25	0.11
19	亚马孙河②	巴西	5 770 000	57 100	3.63	0.06
20	刚果河③	扎伊尔	3 700 000	14 000	0.70	0.05
21	莱茵河③	德国、荷兰、法国、瑞士	362 000	800	0.03	0.04

① 流域面积是指表中所列水沙相应测站控制的流域面积。
② 引自 Todd D K. Water Encyclopedia. Water Information Center，1970。
③ 引自钱宁，周文浩．黄河下游河床演变．北京：科学出版社，1965。

根据河流中泥沙运动的形式，把泥沙分为推移质泥沙和悬移质泥沙。推移质泥沙是在河床面上滑动、滚动或短时间跃离然后又落回床面的泥沙颗粒；悬移质泥沙是悬浮在水流中随水流运动的泥沙颗粒。在一定的水流条件下，这两类泥沙可能同时存在，它们相互之间以及和床沙之间不断存在着交换。

冲积河流中挟沙水流的运动是一种相当复杂的现象。在运动过程中，水流和泥沙相互发生作用。一方面，水流通过消耗其紊动能量挟带和输送泥沙；另一方面，泥沙的存在又反过来改变水流的物理性质和水流结构，从而影响水流中能量、流速和含沙浓度。特别当

水流中泥沙含量较高时，不能忽视泥沙对水流结构的影响。

水利水电工程中的泥沙问题　在中国江河治理和水电建设工作中，泥沙问题十分突出，不少江河上游水土流失严重，大量泥沙进入河道，使治理工作十分困难和复杂。根据水利部第三次全国水土流失普查结果，截至 2000 年，全国水土流失面积为 365.92 万 km^2，占国土面积的 37.6%。年输沙量在 1000 万 t 以上的河流有 115 条，直接输送入海的泥沙每年达 19.4 亿 t。表中列出了中国及世界主要江河的输沙情况，其中黄河是来沙量最多的河流。大量的来沙在河道中堆积，使黄河下游形成了地上悬河，堤内河床高出两岸地面，一旦决口，将会给华北平原的经济建设和人民的生命财产带来巨大的损失。中国的东北和南方的河流，由于流域内地质和植被条件较好，土壤侵蚀相对较轻，有利于水利资源的开发和利用。

水利水电工程中的主要泥沙问题有：

(1) 泥沙在水库中沉积会侵占水库的调节库容，减少水库调节能力，降低水库的防洪能力和兴利效益。水库中泥沙的沉积还会使水库回水上延，抬高上游地区的洪水位，增加淹没损失和浸没损失。

(2) 泥沙在水库变动回水区淤积可能导致航深不足，发生碍航现象。

(3) 低水头枢纽或已淤至平衡阶段的水库，泥沙推进至坝前，可能产生电站进水口淤堵，泥沙进入水轮机组造成磨损等问题。

(4) 对于具有通航建筑物的枢纽，通航建筑物上下游引航道中的泥沙淤积会引起通航困难。

(5) 泥沙在引水渠系中的淤积会导致引水流量达不到设计标准，供水效益降低，并耗费大量清淤的人力和物力，清淤的泥沙还可能占用大量耕地，引起当地生态和环境问题。

(6) 在水库拦蓄泥沙后，清水下泄可能造成下游河道的冲刷下切及河道展宽，甚至引起河势变化，影响堤防、护岸、河道整治工程、取水建筑物等工程设施的安全和效益。

(7) 平原河道中累积性的泥沙淤积会淤高河床、抬高洪水位，降低河道宣泄洪水的能力，增加防洪风险和洪水的灾害与损失。

(8) 航道港口及河口的泥沙淤积，影响航运及河口演变，还可能引进其上游河道的淤积。

河流泥沙问题的研究方法　可以概括为 4 个方面：①室内的水槽试验和物理模型的试验研究；②通过数学模型对泥沙问题进行计算和分析；③利用野外观测资料进行分析；④理论研究及相似工程的类比分析。泥沙理论还不够成熟，通过不同途径，对生产中的泥沙问题进行多方面的综合研究是必要的。

简史　随着经济的发展，越来越多的河流被开发和治理。在实践中，人们对河流泥沙问题获得了广泛而深刻的认识。20 世纪初通过大规模灌溉渠系建设得到的渠道设计“均衡理论”（regime theory）和 20 世纪 30 年代美国胡佛（Hoover）坝建成后发现的异重流现象，就是两个生产实践推动泥沙理论发展的典型例子。中国有长期修筑堤防、治理河道的经验，明朝潘季驯就有“以堤束水，以水攻沙”的论述。在生产实践的推动下，中国河流泥沙的研究取得很大进展。例如在流域泥沙资源化和处理方面，建立了流域泥沙优化配置的理论体系和调控措施；利用来沙集中的汛期降低库水位排沙，保持调节库容长期使用；在引航道中设置冲沙闸，防止淤积，保证航运畅通；低水头枢纽利用弯道环流引水防沙；利用异重流排沙减少水库淤积；利用水库运用调度沉沙取代沉沙池的设置；利用修淤地坝、梯田、地埂、植树造林等综合措施控制水土流失；在高含沙水流和泥沙模型试验的理论和应用方面均取得了可观的成就。

heliu nisha wuli xingzhi

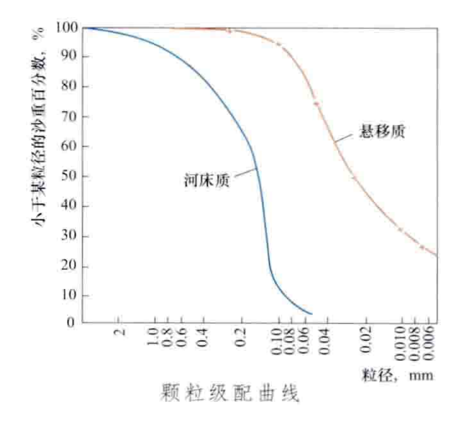
河流泥沙物理性质

（physical properties of river sediment）　主要包括河流泥沙的颗粒形状、容重、粒径和硬度等单颗粒性质，以及级配、干容重、孔隙率及水下休止角等群体性质。泥沙颗粒形状各式各样。砾石、卵石经过磨损比较圆滑，沙类、粉土和黏土类泥沙颗粒多棱角状，外形不规则。容重为泥沙颗粒单位体积的重量。因构成泥沙的矿物成分不同，各种泥沙的容重也有差异，工程上通常采用其平均值 2650kg/m^3。

粒径　以直径表示的泥沙颗粒的大小。按粒径从小到大，泥沙可分为胶粒、黏土、沙、砾石、卵石。较大且较规则的球形颗粒，通常直接量测或用筛分法确定其直径。较细且不规则的泥沙，不易直接测量其直径，通常根据泥沙的沉速反求与该颗粒比重相同、沉速相等的球体的直径作为代表粒径，称沉降粒径。也有用同体积的球体的直径表示泥沙颗粒大小的，称等容直径。

硬度　泥沙由岩石风化而成，不同矿物的泥沙硬度差别很大。高岭土的硬度最低，仅为莫氏硬度 1～2.5，石英的硬度高达莫氏硬度 7。

级配　小于某粒径的泥沙质量占全部泥沙质量的百分数。实际工程中遇到的泥沙是由大小不同的颗粒组成的混合沙。混合沙粒径的粗细常以级配曲线表示，见图。该曲线为粒径与质量累积百分数（即小于该粒径的泥沙重占总重的百分数）的关系。对于卵石、砾石和粗沙，常用筛分法求级配曲线；对细沙和粉土，常用比重计法、移液管法、激光及光电法等推求。



颗粒级配曲线

干容重　单位体积的原状沙样烘干后的质量。泥沙干容重的变化幅度很大，可从 300kg/m^3 到 1700kg/m^3。泥沙粒径越小，沙样空隙率越大，干容重越小；淤积泥沙的位置越深，被上层泥沙压实，干容重越大。此外，淤积历时长短及淤积物是否露出水面在空气中暴露等，对泥沙干容重的大小都有影响。

孔隙率　表示泥沙群体中孔隙的大小，可用下式计算

$$e = 1 - \frac{\gamma'_s}{\gamma_s}$$

式中 e 为孔隙率；γ_s 为泥沙容重；γ'_s 为干容重。

水下休止角　由于颗粒之间的阻力作用，泥沙在水中静止时自成的坡面与水平面之间的夹角（θ）。其计算公式为

$$f_0 = \tan\theta$$

式中 f_0 称为休止阻力系数。对于分散颗粒，休止阻力系数一般随粒径减小而减小，而孔隙率越大，休止阻力系数越小。

heliu shuidian guihua

河流水电规划 (hydropower planning of river)

为合理利用水能资源，制订河流水电梯级开发方案的勘察设计研究工作。河流水电规划应协调发电、航运、防洪、灌溉、供水、渔业、旅游等综合利用要求，并与综合规划和其他专业规划等做好衔接。河流水电规划方案具有较强的时效性，对于长期搁置并存在显著重大制约因素或开发任务产生重大变化导致已批复原河流（河段）水电规划梯级方案难以实施的应及时修编。

河流水电规划以一条河流（或一个河段）为对象，或是干流，或是支流。如果干支流或河流上下游所在地域的经济、社会发展规划关联度较大，或梯级布局方案需统筹考虑，这些干支流（或上、下游河段）应一起进行规划。如果河流较长，其上、中、下游各个河段所在地域的经济、社会发展对河流水能资源的开发利用要求，在时间上相距很远，并且上下游、干支流各自规划对河流整体规划影响不大时，也可以分河段进行规划。

规划内容　包括：①根据河流特点及地区国民经济发展规划，具体分析发电、供水、防洪、灌溉、航运、生态环境保护、地方经济社会发展等方面的合理需求，提出河流开发任务及各项任务的主次关系；②选择河流水电梯级开发方案：梯级组成、上下游工程之间的水位衔接（见梯级水电站）、各工程的开发方式及其所承担的开发任务等；③提出规划实施意见（其中包括开发时序等）；④河流水电开发对环境影响的评价及其对策措施。

规划原则　规划中要贯彻全面规划、统筹兼顾、综合利用、讲求效益的原则，正确处理需要与可能、近期与远景、整体与局部、干流与支流、上游与下游、资源利用与环境保护的关系。以国民经济效益最大或在满足同等效益前提下总费用最小为目标，并考虑各种非经济因素，确定规划方案。规划中，还要注意协调各项综合利用要求和有关地区的权益。

规划基础资料　包括：①规划范围内的自然条件，如水文、地形、地质、交通、气象、环境等；②地区国民经济现状、发展规划和各综合利用部门对本河流水电开发规划的要求；③各项综合利用采取其他工程或非工程替代措施的可能性及相应的代价；④制约条件，如某些河段因水库淹没、生态环境保护要求允许的最高水位、跨流域引水的最大水量、河段或河口的最小生态流量等。

规划方法与步骤　采用多方案技术经济比较的规划方法。其工作步骤为：①根据基础资料初定各项综合利用的合理需求目标。②根据初定目标结合河流自然条件拟定若干个梯级开发比较方案。在拟定比较方案时，要考虑各方案协调各部门和上下游要求的可能性、与地区经济发展的适应性和工程设施在技术上的可行性等。③对各梯级开发方案分别进行径流调节计算、调洪计算等，分析各方案对各项综合利用任务的满足程度和相应的效益。④对各梯级开发方案进行工程布置研究并计算工程量及所需投资。⑤初拟各梯级开发方案的移民安置总体规划方案及相应补偿费用。⑥对梯级方案间效益的差别要考虑采用工程或非工程替代措施，并计算其相应费用或损失。⑦对各梯级开发方案进行环境影响评价，提出环境保护对策措施及相应的投资匡算。⑧进行各方案的技术经济比较，据规划原则选择梯级方案。⑨考虑与国民经济发展过程相适应，提出规划实施意见。

heliu tiji kaifa

河流梯级开发 (cascade development of river)

合理利用河流落差和渠化河道，在同一河流或河段上阶梯式布置一系列水电站的开发方式（见梯级水电站）。

梯级开发原则　包括：①梯级衔接。在没有环境敏感因子或重要的淹没对象的情况下，原则上宜尽量使各梯级的正常蓄水位与上一梯级的正常尾水位互相衔接；对淹没损失小的河段，梯级之间可采用水位部分重叠的布置方式，以充分利用落差、增加调节库容。②对有重要城镇、交通干线、矿产资源以及人口、耕地密集区的河段，经过论证可放弃这一河段落差的利用，以减少淹没；当梯级坝址或库区位于自然保护区、风景名胜区等环境敏感地区时，需与有关方面进行沟通和协调，探讨保护区范围调整的可能性或放弃该河段的水能开发。③库容安排。位于河流较上游的梯级，宜尽可能安排较大的兴利库容，以提高下游各枢纽的调节流量，从而增加各梯级总的供水量、保证出力和发电量。这类控制性的水库，习惯称龙头水库。靠近防洪保护区上游的梯级，宜尽可能安排较大的防洪库容，以有效地调控洪水。

梯级开发内容　包括：①开发任务。除水力发电、航运外，还涉及防洪、灌溉、工业及城市生活供水、渔业、旅游、水质控制、地区经济社会发展等，通常要根据国民经济各部门的要求和河流、河段条件研究确定。②可能的坝址与规模。涉及河段的地形、地质、落差利用、水工建筑物布置、施工场地、天然建筑材料、对外交通以及有关部门的取（引）水口位置和高程等条件。③方案拟定。对所有地形和地质上有建坝可能的河段，都要研究其开发的可能性，并综合考虑其他因素，拟定出若干个以控制性枢纽为主体的开发方案。④方案选择。采用系统工程和经济分析方法选择经济指标好，并能满足近远期要求的梯级开发方案。⑤梯级开发程序。对梯级开发方案中的各个梯级枢纽，进行技术经济综合分析比较，根据供电区电力系统需要和地区经济发展及人民生活用电要求等选出其中一个或数个工程首先兴建，同时提出后继梯级开发顺序。一条河流的梯级开发方案是个有机的整体，各个梯级之间有着相互依存、相互制约的关系。为此，在研究梯级开发程序时，不能仅以各个梯级工程单独的作用与经济指标为选择依据，而应注意评价梯级方案的整体作用与整体经济效益。

梯级连续开发　梯级水电站的梯级效益随着各级电站的逐步建成而逐渐增长，在适应国民经济发展需要的前提下，连续开发梯级水电站的优点有：①可尽快实现梯级效益；②可优化安排各级水电站的施工进度，施工期互相搭接而施工高峰又互相错开可加速整个梯级水电站的开发进程；③可提高施工设备和施工场地的利用率；④有利于梯级调度和电网建设。由于上述优点，梯级连续开发可降低造价，缩短工期，加速实现梯级效益。

梯级开发实例　世界各国普遍重视梯级开发，一般在上游尽可能设置调节性能好的水库，中下游根据综合利用要求及开发条件安排梯级，而其开发顺序则根据经济发展需要并考虑项目的经济性安排。如哥伦比亚（Columbia）河，上游在加拿大，下游在美国，干流长约2000km，落差808m，见图。美国于1932～1972年先建11级水电站，共装机11720MW，总库容207亿m^3。流域内有灌区27个，灌溉面积22万hm^2。自河口到波特兰长185km河段航深达12.2m，可通航2.6万t级海轮。下游4级及支流斯内克河4级水电站都建有船闸和鱼梯。1961年1月17日，美国和加拿大签订哥伦比亚河条约，按条约加拿大在上游建麦卡（Mica）等3座水库（见表），其中有1座在支流，美国则在支流库特内河上建利贝（Libby）水库，为干流中下游调节水量。由于美国西北与西南联网，要求哥伦比亚河水电站担负更多调峰任务，美国11座水电站装机容量扩大到19530MW。加拿大在干流已建2级电站，装机容量3580MW。干流两国合计装机23110MW。苏联伏尔加河处于其经济最早开发地区，是一条平原、丘陵型河流。干流全长3700km，利用落差256m，规划分9级开发。第二次世界大战前先开发了上游3级（1～3级）水电站，目的是解决与外海的航运联系及向首都莫斯科市的供水供电。1948～1985年又相继开发第4、6、8、7、5级水电站，以发电和改善航运为主，兼顾农业和渔业。第9级尚未开发。已开发的8级水电站共装机8603MW，其中规模最大的伏尔加格勒（Волгоград）水电站装机容量2563MW。欧洲的罗讷河，1936年法国成立罗讷河公司，负责开发罗讷河；1980年，罗讷河的12座梯级水电站全部建成，总装机容量2174MW，330km河段航道全部渠化，航道水深3.5m以上。



哥伦比亚河梯级开发示意图

哥伦比亚河干流水电站开发情况

国家	电站	名称	工程性质	国家	电站	名称	工程性质
加拿大	1	麦卡	已建	美国	10	瓦纳普姆	已建
	2	雷维尔斯托克	已建		11	普里斯特滩	已建
	4	墨尔菲溪			12	本富兰克林	
美国	5	大古力	已建		13	麦克纳里	已建
	6	契夫约瑟夫	已建		14	约翰迪	已建
	7	韦尔斯	已建		15	达尔斯	已建
	8	石河段	已建		16	邦纳维尔	已建
	9	罗克岛	已建				

中国也是在全河或局部河段统一规划下实施梯级开发。中国南盘江红水河规划按10级水电站已基本开发完毕。据广西壮族自治区用电增长过程及开发条件先建成大化水电站和恶滩水电站，后相继建成天生桥二级水电站、岩滩水电站、百龙滩水电站和天生桥一级水电站。已建水电站装机容量总计4382MW，占全梯级的37.2%。其中天生桥二级水电站采用引水式开发，而天生桥一级水电站以其巨大的调节库容消除了二级引水式水电站无调节径流能力的缺点，并提高其他各级水电站的效益。已建的龙滩水电站和待建的大藤峡水电站规划设置防洪库容，可提高西江干流和珠江三角洲地区的防洪标准（见红水河水电规划）。长江宜宾—宜昌段的开发任务是防洪、发电、航运。该河段有中国规模最大的长江三峡水利枢纽，电站装机容量22500MW。建成后显著提高其下游河段的防洪能力，并向缺乏能源的华中、华东地区和广东供电，并可使万吨级船队直达重庆。其下游已建的葛洲坝水利枢纽，装机容量2715MW，由单独运行时的径流式水电站改变成为对长江三峡水利枢纽进行反调节的枢纽，以协调发电和航运之间的矛盾［见长江（宜宾—宜昌段）水电规划］。黄河上游在20世纪70年代以前先建了刘家峡、盐锅峡、八盘峡、青铜峡等4级水电站，对中国西北地区经济发展起了重要作用，提高了刘家峡以下河段的防洪能力，满足了灌溉的需要。80年代建成龙羊峡水电站，在扩展了电源的同时，以其巨大的调节库容与刘家峡水电站联合调度，进一步提高了防洪能力并协调了发电用水和灌溉用水在时空分配上要求不同的矛盾。此后又相继建成李家峡、大峡、公伯峡等水电站，将来待规划黄河上游各梯级水电站建成后，梯级联合调度将更好地发挥综合利用的优势，使发电、灌溉、防洪、防凌发挥最大效益（见黄河上游水电规划）。

黄河上游龙羊峡至青铜峡河段、乌江干流、澜沧江中下游、雅砻江下游等大型河规划梯级已基本全部建成发电，古田溪、以礼河、龙溪河、猫跳河、火溪河等中型河流规划梯级已全部建成。

Heilong Jiang shuixi Zhongguo bufen shuineng ziyuan

黑龙江水系中国部分水能资源 [hydropower resources of Heilong River System (within China)] 据《中华人民共和国水力资源复查成果(2003年)》统计，黑龙江是世界大河流之一，中国境内部分水能资源理论蕴藏量为1076.68亿kW·h/a，占中国水能资源的1.77%；技术可开发装机容量为13718.3MW，多年平均年发电量358.99亿kW·h，占中国水能资源的1.45%。黑龙江水系中属于中国、俄罗斯两国界河的河段有额尔古纳河、黑龙江上中游及支流乌苏里江，这些河段的水能资源按中国和俄罗斯各半统计，中国部分资源量分布见表1。

表1 黑龙江水系中国部分水能资源分布表

河流名称	理论蕴藏量(亿kW·h/a)	技术可开发量		
		电站数量(座)	装机容量(MW)	年发电量(亿kW·h)
水系合计	1076.68	308+9/2	13718.3	358.99
干流：	264.18	2+9/2	4203.2	136.02
海拉尔河段	13.29	2	13.2	0.47
额尔古纳河段	27.16	3/2	140.0	4.54
黑龙江河段	223.73	6/2	4050.0	131.01
支流：松花江	620.56	245	7789.0	178.44
海拉尔河	25.47	5	19.6	0.64
根河	12.40	1	10.9	0.39
激流河	33.02	2	304.0	9.33
额穆尔河	12.85	3	185.0	4.33
呼玛河	39.75	6	607.0	15.30
其他支流	68.45	44	599.6	14.54

注：干流包括额尔古纳河和黑龙江上中游。各支流的水能资源量中包括其干流及支流的资源量。

黑龙江流域跨中国、蒙古、俄罗斯三国。源流有两条：北侧源流称石勒喀河，在俄罗斯境内；南侧源流发源于蒙古，流经中国，在呼伦湖以上称克鲁伦河，以下称额尔古纳河。石勒喀河和额尔古纳河汇合后始称黑龙江。黑龙江在中国侧的主要支流有海拉尔河、呼玛河、松花江和乌苏里江。全流域面积185.5万km²，在中国境内的面积约90万km²，其中松花江水系的流域面积约为56万km²。

黑龙江上中游干流河段及额尔古纳河水能资源 黑龙江在黑河市以上的河段为上游。黑龙江上游河段长901km，平均比降0.2‰。河道两岸为山间盆地或山谷，可筑坝形成大水库以调节径流，是干流中水能开发利用条件最好的河段。干流从黑河市到乌苏里江汇入口为黑龙江中游段，河长988km，平均比降0.09‰。除在逊克至萝北有局部峡谷段可开发利用水能资源外，其余河段为宽阔的河谷，两岸岸坡平缓且低洼，水能资源难以利用。额尔古纳河河长946.6km，流域面积155000km²，比降平缓，河道比降约0.249‰。黑龙江上中游干流及额尔古纳河水能资源理论蕴藏量中国部分为250.89亿kW·h/a。中国和俄罗斯自20世纪50年代起即对该河段的开发进行规划。20世纪90年代中俄双方共同进行的额尔古纳河和黑龙江界河段规划，两国各自提出了梯级开发方案。中国通过技术经济比较后推荐了漠河、连崟、鸥浦、呼玛、黑河、太平沟6级梯级开发方案，装机容量4050.0MW，多年平均年发电量131.01亿kW·h。

松花江水系水能资源 松花江是黑龙江右岸的最大支流，全在中国境内，是中国七大江河之一。松花江北源嫩江发源于大兴安岭的伊勒呼里山，自北向南流；南源第二松花江发源于长白山天池；嫩江和支流第二松花江汇合后始称松花江，自西向东流，后折向东北流，于同江县汇入黑龙江。松花江水系理论蕴藏量620.56亿kW·h/a，技术可开发容量7789.0MW，多年平均年发电量178.44亿kW·h。资源分布见表2。

表2 松花江水系水能资源分布表

河流名称	流域面积(km²)	河道长度(km)	理论蕴藏量(亿kW·h/a)	技术可开发量		
				电站数量(座)	装机容量(MW)	年发电量(亿kW·h)
松花江水系合计	561222		620.56	245	7789.0	178.44
(一)嫩江	298502		237.00	54	1624.9	41.05
1. 干流			47.40	5	608.4	15.26
2. 支流			189.59	49	1016.5	25.79
(二)第二松花江	73416	569.7	131.54	81	3887.4	75.06
1. 干流			49.48	4	2764.0	47.07
2. 支流			82.06	77	1123.4	27.99
(三)松花江干流	189304	939.0	252.02	110	2276.6	62.33
1. 干流			127.21	7	610.0	22.79
2. 支流			124.82	103	1666.6	39.55

嫩江流域跨内蒙古、黑龙江、吉林三省，流域面积298502km²，嫩江出口处多年平均流量1102.5m³/s，理论蕴藏量237.00亿kW·h/a，技术可开发装机容量1624.9MW，多年平均年发电量41.05亿kW·h。

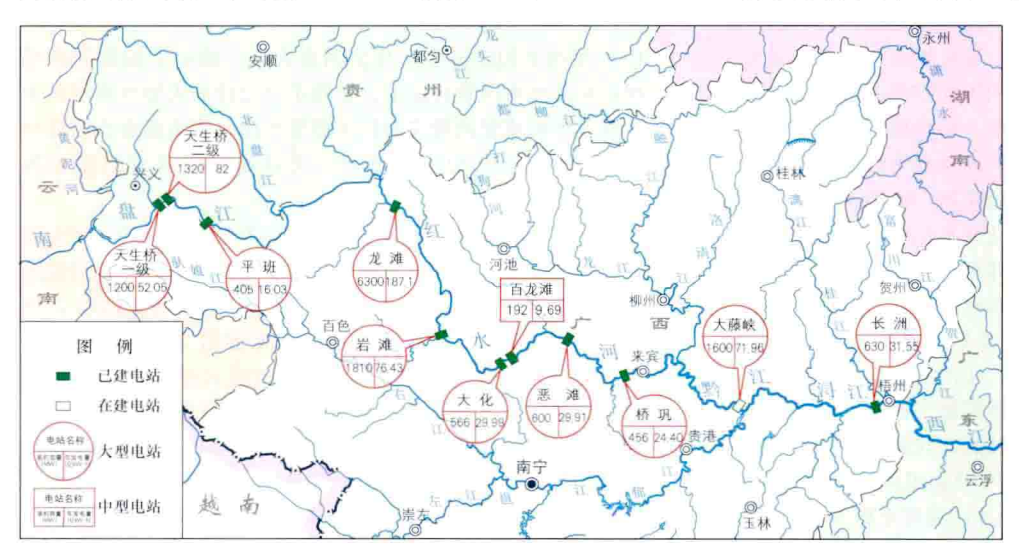
第二松花江流域面积73416km²，是松花江的最大支流，水能资源开发利用条件最好。具有理论蕴藏量131.54亿kW·h/a，技术可开发装机容量3887.4MW，多年平均年发电量为75.06亿kW·h。

Hongshui He shuidian guihua

红水河水电规划 (hydropower development planning of Hongshui River) 据1981年国务院批准的《红水河综合利用规划报告》和1987年水利电力部珠江水利委员会提出的《西江干流大藤峡至高要段综合利用规划报告》，在南盘江下游、红水河及黔江布置有天生桥一级、天生桥二级、平班、龙滩、岩滩、大化、百龙滩、恶滩、桥巩、大藤峡、长洲共11级水电站。南盘江红水河干流规划11级电站总装机规模15079MW，多年平均年发电量611.1亿kW·h，见下图。

红水河是珠江流域西江水系的干流，包括南盘江、红水河、黔江、浔江等河段。其上游主流是南盘江，发源于云南省东部沾益县马雄山，自汇入支流清水江后，成为黔、桂两省(区)的界河，流至黔、桂两省(区)交界处蔗香村与北盘江汇合后始称红水河；在广西象州县的三江口与柳江汇合后称黔江；流经122km至广西桂平与支流郁江汇合后称浔江，浔江河长172km，流至广西梧州与支流桂江汇合后始称西江；西江东流至广东与北江汇合后向南流入珠江三角洲河网区，主流由磨刀门注入南海。红水河包括南盘江在内，河长1553km，流域面积326594km²，占整个西江流域面积的

92.5%。红水河流域水量丰沛，落差集中，从南盘江下游的天生桥到浔江的长洲，全长1223km，落差775m。



红水河梯级开发示意图及开发现状

红水河至浔江河段的开发任务以发电为主，兼顾防洪、航运、灌溉等综合利用要求。随着社会经济的发展、城市化水平不断提高，区域对供水水量与水质的需求逐步升级，为满足下游澳门与珠江三角洲地区压咸补淡的需要，红水河梯级电站在红水河流域开发中需承担河流生态和水资源配置的新任务。此外，梯级电站的开发还可促进当地的景观和旅游以及渔业养殖的发展。

红水河梯级水电站距中国经济发达的沿海地区近，水量充沛且调节性能好，地形地质条件优越，水库淹没损失相对少。防洪的主要对象是其下游浔江、西江干流两岸及珠江三角洲。珠江流域防洪规划在龙滩及大藤峡两电站水库设置防洪库容，并与河道两岸的防洪堤防配合运行以减轻洪灾损失。梯级水电站全部建成后，水库淹没河道的浅滩，增大枯水期流量，配以适当航道整治，可使龙滩以下全河通航，为贵州、广西开辟出海通道，有利于地区经济发展。11座梯级水电站中，位于上游的天生桥一级水电站和龙滩水电站的库容最大，可实施多年调节，不仅可提高本梯级电站的供电质量，还可对电力系统内其他水电站进行补偿调节，是梯级的骨干工程。从防洪角度看，以大藤峡电站水库距防洪对象最近，调节洪水的效果最好。由于大藤峡库容较小，龙滩水库还要承担防洪任务。

南盘江红水河水电开发历程较早，开发程度较高。南盘江红水河规划的11座水电站中已经建成10座，装机规模11479MW，大藤峡水利枢纽未建设但已完成项目建议书。国家发展和改革委员会正在组织开展龙滩水电站正常蓄水位抬高至400m方案的研究论证工作。

hongshui

洪水　(floods)　由于暴雨、冰雪融化、风暴潮、水库溃决等引起的河流流量迅速增加、水位急剧上涨的现象。洪水会淹没堤岸滩涂，甚至漫堤泛滥成灾，造成人员伤亡和重大经济损失，自古就引起人们的重视。在中国有关洪水的最早文字记述见于《尚书·尧典》，记载了公元前2297年的一次洪水。

洪水能给人类带来灾难，但又是河流水资源的主要组成部分。在中国的河川径流多年平均值中，洪水水量所占比重达50%～60%。因此，使洪水转变为可利用水资源是治水的主要任务。修建水利水电工程时，必须考虑建筑物可能承受洪水破坏的风险，按工程的重要性及失事后对下游的影响，采用不同标准的设计洪水，妥善处理安全与经济的关系。人类在长期与洪水灾害的斗争中，不断揭示与洪水形成有关的因素及其变化规律，改进并完善各种途径的洪水预估及预报的理论、方法和各类数学模型和水文模拟。但由于影响洪水变化的因素（如天气系统、暴雨中心位置及走向、流域形态、地表植被等）的复杂性，对洪水的认识仍待进一步深入。

一次洪水过程可用洪峰流量、时段洪量及洪水过程线3个要素描述，同时也可据此比较各河流洪水的量级和特性。19世纪以来，中国主要江河都曾发生特大洪水，如1998年松花江大水，1939、1963年海河大水，1843、1933、1958年黄河大水，1931、1975年淮河大水，1870、1931、1954、1998年长江大水，1915、1949年珠江大水。其中长江、黄河、珠江、松花江几次大洪水的量级及特性见表。

长江、黄河、珠江、松花江几次大洪水的量级及特性

河名	站名	集水面积 (km^2)	洪峰流量 (m^3/s)	时段洪量		发生年份	备注
				洪量 (亿 m^3)	历时 (d)		
长江	宜昌	1005501	105000			1870	调查
	宜昌	1005501	63600			1998	实测
	宜昌	1005501	70000			2010	实测
	宜昌	1005501	71200			2012	实测
	汉口	1488036	76100	3220	60	1954	实测
黄河	陕县	687869	22000	108	15	1933	实测
	陕县	687869	36000			1843	调查
	花园口	730036	22300	101	15	1958	实测
珠江	武宣	196255	45600	606	30	1949	实测
	梧州	329705	54500	856	30	1915	实测
松花江	齐齐哈尔		14800			1998	实测
	哈尔滨	390529	17300			1998	实测

洪水的成因有：①流域内冰雪融化或降暴雨。②河流入海口段受到暴潮顶托。③冰凌阻塞水流。④因地震或其他原因发生岩崩滑坡，阻塞河流，抬高水位，当阻塞体溃决时，对下游形成突发性洪水。这种情况，有时也发生于挡水建筑物的失事。前3种成因是主要的、经常的，形成融雪洪水、

暴雨洪水、冰川洪水和暴潮洪水。

融雪洪水　由流域中冬季积雪于春暖期融化进入河中，形成洪水，也称春汛。在北半球高纬度地区，如北欧、加拿大等地河流以春汛为主要洪水。春汛特点是洪水总量大，涨落相对较缓，洪水历时较长。中国北方河流在春季因流域内积雪及结冰融化，引起河流涨水，俗称桃花汛，其洪峰流量均小于夏秋汛。黄河及一些北方河流冬季封冻，春暖时开河流凌，有时上游先开河而下游尚结冰，流动冰块在下游堵塞堆积，形成冰坝，水流受阻，造成水位猛涨，称为凌汛。

暴雨洪水　多发生于中低纬度地区，如中国、日本、印度、美国、巴西等地。暴雨洪水过程特征、峰量大小主要决定于：①暴雨不同历时强度；②暴雨中心位置及其移动方向；③暴雨面分布和时程分布；④产流、汇流条件等。

中国暴雨洪水发生时间因不同地区而异，福建、湖南等省各河流常始于4月；珠江流域的北江和东江则出现于5～6月，西江6～7月；淮河、黄河中下游及海河一般出现于7～8月；松花江干流出现于8～9月；黄河上游及汉江则到10月仍有洪水发生。暴雨洪水是中国河流上的主要洪水，年际变化很大，造成灾害最严重。中国境内的暴雨洪水主要类型有：①受大尺度大气环流条件和西太平洋副热带高压位置的相互作用在大陆上空形成大范围静止锋面，再受中间尺度的扰动而在较大范围内持续降雨，降雨范围可达数十万平方千米，历时可达数十日。这种降雨会在较大流域上形成洪水，其特点是洪水涨落较缓，历时长，洪量较大，且往往和平原区内涝同时发生，加重灾害，如长江1931年、1954年、1998年洪水。②因气旋性热带风暴及台风，以及大陆强低涡形成的洪水，是亚洲东南沿海及中国东部大洪水的主要形式。因低压中心携带大量水汽，降雨强度大，形成的洪水峰、量均较大。有时暴雨中心在移动过程中遇系统阻滞，在局地停留或回旋，造成大洪水，对防洪安全威胁很大，如淮河1975年8月的洪水。③由局部强对流云团形成强暴雨，雨区不大，历时短，强度很大，往往在小流域上形成大洪水，其特点是洪水陡涨陡落，历时很短，洪水过程尖瘦，在局部可造成严重损失。在山区，这类洪水又称山洪或骤发洪水，且常伴有*泥石流*。

冰川洪水　有冰川和永久积雪的高山区在夏季冰川和积雪融化，河中流量迅速增加而形成洪水。冰川洪水的特征是随日温而变化，常具有一日一峰的特点。在中国天山、昆仑山、祁连山和喜马拉雅山区都有发生。有时夏季因温暖雨降在冰川或积雪上造成混合型洪水。

暴潮洪水　在河口处发生高潮，同时河流来水也较大，高潮顶托河水而导致水位猛涨。这类洪水对处在河口处的城市影响较大。中国的上海和英国的伦敦都受到暴潮洪水的威胁。

参考书目

陶诗言，等．中国之暴雨．北京：科学出版社，1980.

胡明思，骆承政．中国历史大洪水．北京：中国书店，1989.

hongshui diaocha

洪水调查 (flood investigation)

对历史上出现过的和近期发生的大洪水进行调查和估算。目的是弥补实测水文资料的不足，以便进一步提高水利水电工程设计洪水计算成果的精度。例如长江流域中游河段1870年、1935年洪水，金沙江下游1813年、1860年洪水，黄河中游1843年、1933年洪水均经过多次反复调查论证，确定了数值和重现期，对这些地区和河段上已建和正在设计的大型水库水电工程设计洪水成果的确定起到了重要作用。洪水调查方法可分为现场调查、历史文献考证、洪峰流量和各时段洪量的估算。

现场调查　调查的内容一般包括洪水发生时间、洪水痕迹、洪水成因、洪水来源、当时河道和断面情况，施测洪痕高程、洪水水面比降、河段纵断面及河道简易地形等。洪水发生时间是确定洪水重现期的重要依据。除洪痕处有日期刻记者外，可结合对群众生活影响较大的事件和文献记载查访确定。洪痕调查是对人工刻记及所遗留的水迹、泥印等一切能够代表最高洪水位所达位置标志的调查和高程测量。洪水过程调查是确定洪量和峰型基本资料，可通过对群众当时受洪水威胁情况所定洪水涨、落所达位置和相应时间的调查来推估。洪水成因调查是确定洪水类别。有的大洪水是由于地震造成山崩堵塞河道而后溃决或上游水库失事溃决造成的，北方河流有因冰坝、冰塞壅高水位或溃决形成洪水，这些均要和*暴雨洪水*或*融雪洪水*区分开。河道和断面情况调查是在洪水流量估算中确定过水面积、比降、糙率等水力因素的依据，对于多沙和断面冲淤变化较大的河流尤为重要。

历史文献考证　中国史籍、文献、碑文、档案中有丰富的洪涝记载，不仅有大量的雨情、水情、灾情的定性记载，而且有许多定量记载。广泛收集，详细分析是洪水调查工作的重要内容。如根据北魏《水经注》记载，确定洛河龙门曾于公元223年发生过一次20 800m^3/s的特大洪水，对研究这一地区历史洪水量级、洪水重现期以及设计洪水计算起到重要作用。对于某些河流出现的特大洪水，如1954年长江、1958年黄河、1963年海河、1975年淮河，均曾组织了详细调查，写出了专门报告。20世纪70年代中期以来，各流域、省、市、区均分区全面开展了洪水调查工作，并已汇编成册，如已出版的《中国历史大洪水》等，均是中国宝贵的洪水调查文献资料。

洪峰流量和各时段洪量的估算　根据调查得到的洪痕点分布及调查河段的水力特性条件，选用适当的计算方法计算洪峰流量；根据调查或文献考证所得的洪水位涨落过程，通过该河段所建立的水位流量关系，推求出流量过程线，据此即可估算各时段的洪量。当调查河段内有水文测站时，利用该站已建立的水位流量关系和洪峰与各时段洪量关系，即可求得洪峰流量及相应的各时段洪量。

另外，对于特别重要的大型水库，可根据工程设计需要进行古洪水调查考证分析，以提高设计洪水的精度。古洪水主要是应用地层学、地质学、年代学、水力学、水文学等多学科理论和方法，研究发生在历史调查洪水考证期以前河流上的大洪水。中国的响洪甸、黄壁庄、三峡、小浪底、藏木等工程曾开展过古洪水的应用研究。

参考书目

水利电力部东北勘测设计院．洪水调查．北京：水利电力出版社，1977.

hongshui tiaojie

洪水调节 (flood regulation) 为保证大坝安全及库区和下游防洪，利用水库控制下泄洪水流量的径流调节，简称调洪。洪水调节的内容包括防洪标准的确定、调洪库容及其配置、洪水调度及洪水调节计算。

防洪标准 防护对象防御洪水能力相应的洪水标准，一般按以年为单位的洪水重现期来表达。洪水调节按照一定的防洪标准进行，水电站大坝和主要建筑物及库区和下游防护区等对象因重要性不同而有不同的防洪标准。世界各国有各自不同的标准。中国 GB 50201《防洪标准》规定了水利水电枢纽工程的等别和级别，以及水库工程挡水建筑物和水电站厂房的防洪标准。

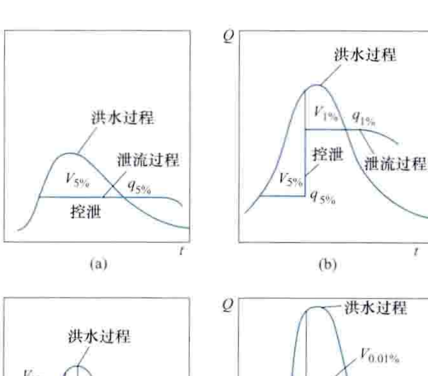
调洪库容及其配置 调洪库容是指水库为拦蓄洪水而充蓄的容积。调洪库容一般由两部分组成：①为下游防洪区调洪而设置的库容，也称防洪库容。②为保坝而设置的库容。

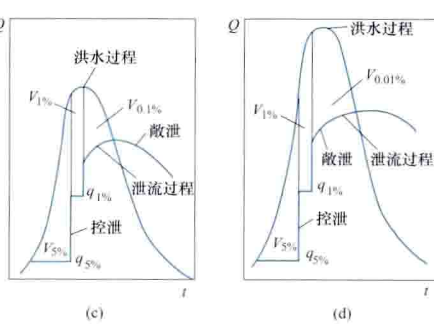
调洪库容的配置有两种情况：①全部在正常蓄水位以上。②正常蓄水位以上和以下各设置一部分，正常蓄水位以下的调洪库容（正常蓄水位至防洪限制水位之间的库容），称为共用库容。

洪水调节一般按坝址洪水及静库容进行，但对建库后产、汇流条件有明显改变的水库，可按入库洪水及静库容和动库容调节。

洪水调度 即防洪调度。为有效地利用库容调洪，且不致造成人为洪灾，按下述规则进行洪水调度：①当无洪水预报时，宜按防洪标准，由小到大逐级调节：当洪水流量大于某一标准的洪峰流量，且水库水位达到该标准的最高洪水位时，才允许按大一级的洪水进行调节。②当有可靠的洪水预报时，可以在洪峰到来以前，预泄部分防洪库容，但要计及可能的预报误差，留有余地。③对于常出现历时较长的多峰型的河流，一个洪峰过后，应在不造成人为洪灾的前提下，尽快腾空调洪库容。

逐级洪水调节示意图见图。洪水频率 $P=5\%$ 及 $P=1\%$ 为下游防洪标准，$P=0.1\%$ 及 $P=0.01\%$ 为保坝标准。图（a）表示对 $P=5\%$ 的洪水过程控制泄流量为 $q_{5\%}$，相应防洪库容为 $V_{5\%}$。图（b）表示对 $P=1\%$ 的洪水，先按 $P=5\%$ 的控制泄流量 $q_{5\%}$ 进行调洪，当水库蓄洪 $V_{5\%}$ 且洪水流量大于 $P=5\%$ 的洪峰流量时，按 $P=1\%$ 的控制泄流量 $q_{1\%}$ 进行调洪，总蓄洪量为 $V_{5\%}+V_{1\%}$。图（c）和图（d）分别表示，对于 $P=0.1\%$ 及 $P=0.01\%$ 的洪水，顺序按 $P=5\%$ 及 $P=1\%$ 的洪水进行调洪，当水库蓄洪量达到 $V_{5\%}+V_{1\%}$，洪水流量大于 $P=1\%$ 的洪峰流量时，闸门全开进行敞泄，按 $P=0.1\%$ 及 $P=0.01\%$ 保坝调洪，水库分别蓄洪 $V_{5\%}+V_{1\%}+V_{0.1\%}$ 及 $V_{5\%}+V_{1\%}+V_{0.01\%}$，即为相应的1000年一遇及10 000年一遇洪水调洪库容。对于各频率的调洪过程，均应进行相应的调洪计算。





逐级洪水调节示意图
(a) $P=5\%$；(b) $P=1\%$；
(c) $P=0.1\%$；(d) $P=0.01\%$

洪水调节计算 包括计算原理、计算方法、敞泄的调洪计算、梯级水库洪水调节、错峰洪水调节等。

计算原理 洪水调节计算为非恒定流计算，要求解圣维南方程组，即

$$\frac{\partial W}{\partial t}+\frac{\partial Q}{\partial S}=0 \tag{1}$$

$$i_0-\frac{\partial h}{\partial S}=\frac{v^2}{c^2R}+\frac{1}{g}\times\frac{\partial v}{\partial t}+\frac{1}{g}\times v\frac{\partial v}{\partial S} \tag{2}$$

式中 W 为断面面积，m^2；t 为时间，s；Q 为流量，m^3/s；S 为距离，m；i_0 为河底比降；h 为平均水深，m；v 为断面流速，m/s；c 为谢才系数；R 为湿周，m；g 为重力加速度，m/s^2。

可采用瞬态法或特性线法近似求解。

在工程设计中，一般假定水库水位与容积在单位计算时段内成直线变化，故可改为解下列方程式

$$\frac{Q_1+Q_2}{2}\Delta t-\frac{q_1+q_2}{2}\Delta t=V_2-V_1 \tag{3}$$

式（3）即为按坝址洪水及静库容求解一个时段调洪的水量平衡方程。式中下角标1、2表示调节时段始、末；Q、q 为时段洪水流量、泄流量，m^3/s；V 为水库容积，m^3/s；Δt 为调洪单位时段长，s。

计算方法 根据洪水调节的规则，将式（3）与水库水位（容积）和泄流能力关系曲线式（4）、式（5）联立求解

$$q=f(Z) \tag{4}$$

$$Z=f(V) \tag{5}$$

式中 Z 为水库坝前水位。

所需资料：①与各种防洪标准相应的洪水过程。②水库容积与泄流能力关系曲线。③下游防洪要求的控制泄量。④各泄流设施的泄流能力曲线及启用原则。

求解步骤：①起调库容为与正常蓄水位（或防洪限制水位，或运行控制水位）相应的库容。②根据洪水调度规则确定泄流量 q_2。③按库容求泄流能力，若泄流能力大于或等于 q_2，且 $Q_2\geqslant q_2$，则控制泄量调节，即 q_2 已知，可按式（3）求得 V_2。④若泄流能力小于 q_2，则闸门全开按泄流能力泄洪，叫做敞泄。⑤每一个防洪标准的调洪结束时，可得到该标准的调洪最大库容，作为大一级防洪标准加大泄流量的依据。

敞泄的调洪计算 调洪计算一般采用数值试算法，即先假定 q_2 值，用式（3）解 V_2 值；再以 V_2 值用式（4）求泄量 q'_2，若 q_2 与 q'_2 充分接近，则该时段算毕，否则需重新假定 q_2 值，继续迭代计算，是计算机常用的方法。

梯级水库洪水调节 自上而下逐级调节，下一级的洪水过程是按上一级的泄流过程进行洪水演进计算，到达下游梯级并与区间洪水汇合而成。洪水演进计算广泛应用马斯京根法（见洪水演进）。

错峰洪水调节 水库调洪考虑与下游区间洪峰错开，使

水库泄流量到达下游防洪区与区间洪水遭遇后，不大于按标准的安全泄量，又叫做补偿洪水调节。这种调洪方式下，水库的泄流量取决于错峰的需要。错峰洪水调节也需进行洪水演进计算，且需应用试算法求得满足防洪要求的水库泄流过程。错峰洪水调节需分析区间洪水预报的可靠性、预报期及精度，以及坝址至下游防洪断面的流达时间等因素。

参考书目

电力工业部成都勘测设计院．水能设计．北京：电力工业出版社，1981.

华东水利学院，叶秉如．水利计算．北京：水利电力出版社，1985.

hongshui yanjin

洪水演进 (flood routing) 研究洪水波沿河道（或分洪区、滞洪区）传播演变的计算方法。目的是根据上游干支流出现的洪水过程及区间来水，预报下游某断面的洪峰流量、出现时间、最高水位及洪水过程，为下游洪水预报及防洪提供依据。洪水波传播属河道不恒定流，其演变规律符合圣维南方程组。沿河道的洪水演进分水文学方法与水力学方法两类。

水文学方法 用河段水量平衡方程和槽蓄方程分别代替圣维南方程组中的连续方程和动量方程

$$I - O = \frac{dW}{dt} \quad (1)$$

$$W = f(I, O) \quad (2)$$

式中 I、O、W 分别为河段入流、出流和槽蓄量；t 为时间。联解式（1）和式（2）可求得洪水演进方程。水文学方法简单直观，其成果精度取决于实测资料的可靠性与完整性。此类方法很多，比较常用的方法有马斯京根法（Muskingum Method）与经验槽蓄曲线法等。

（1）马斯京根法。其基本方程为

$$O_2 = C_0 I_2 + C_1 I_1 + C_2 O_1 \quad (3)$$

其中

$$C_0 = \frac{0.5\Delta t - Kx}{0.5\Delta t + K(1-x)}$$

$$C_1 = \frac{0.5\Delta t - Kx}{0.5\Delta t + K(1-x)}$$

$$C_2 = \frac{0.5\Delta t - Kx}{0.5\Delta t + K(1-x)}$$

式中 O_1、O_2 分别为出流断面时段初、末流量；I_1、I_2 分别为入流断面时段初、末流量；Δt 为时段长；K 为蓄量常数，具有时间因次；x 表示在求槽蓄量时入流量与出流量的相对权重。K、x 值可由实测地形和水文资料确定。已知入流过程及起始出流量，可按式（3）求得出流过程。当洪水变化缓慢时，该法所得成果的精度能满足工程设计及洪水预报要求，实际应用较广。

（2）经验槽蓄曲线法。根据河段实测入流和出流及槽蓄量资料，建立关系（经验槽蓄曲线），已知入流过程，经与水量平衡方程联立求解，即可求得出流过程线。

水力学方法 可分为详算法和简算法。详算法又称水动力学方法，按圣维南方程组式（4）和式（5）求解：

连续方程

$$\frac{\partial Q}{\partial S} + \frac{\partial A}{\partial t} = q \quad (4)$$

动量方程

$$i - \frac{\partial h}{\partial S} = \frac{1}{g} \times \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{v}{g} \times \frac{\partial v}{\partial S} + \frac{v^2}{C^2 R} \quad (5)$$

式中 Q 为流量，m^3/s；A 为过水面积，m^2；S 为距离，m；t 为时间，s；q 为区间单位长度入流量，$m^3/(s \cdot m)$；i 为比降；h 为水深，m；g 为重力加速度；v 为断面平均流速，m/s；C 为谢才系数；R 为水力半径，m。

简化法即略掉动量方程式（5）中的加速度 $\frac{1}{g} \times \frac{\partial v}{\partial t}$ 项和流速水头 $\frac{v}{g} \times \frac{\partial v}{\partial S}$ 项求解，又称运动波法或扩散波法。对于洪水波变化缓慢的情况，其计算成果也能满足工程设计和洪水预报精度的要求。

由于计算机的广泛应用，洪水演进的水动力学方法发展了特征差分和直接差分等数值计算方法。直接差分法又分为隐式差分法与显式差分法两种（见明渠不恒定流）。水力学方法理论比较严密，对基本资料要求较高，成果比较系统全面，在工程设计中日益广泛使用。差分法需要河道纵横断面资料、糙率资料及计算初始时沿程各断面的流量和水位资料，上边界条件为干支流洪水过程线，下边界条件一般为控制断面的水位流量关系曲线。

分洪区或滞洪区的洪水演进方法需要用平面二维不恒定流方程求解（见明渠不恒定流），所需基本资料为分洪区或滞洪区的地形资料和糙率资料，初始条件为区内各处的水深（或水位）及流速分布数值，特例情况是区内干涸无水。边界条件为进洪闸和退水闸的水位流量关系。分洪区和滞洪区洪水演进也可用简算法或水力模型试验方法解决。

hongshui yubao

洪水预报 (flood forecasting) 根据洪水形成和运动的规律，利用过去和现时的水文、气象资料，通过计算分析，对未来一定时段的洪水发展情况的预测。主要预报项目包括最高洪峰水位（或流量）、洪峰出现时间、洪水涨落过程、洪水总量等。洪水预报是防洪度汛的一项重要的非工程措施。中国对 1958 年黄河下游、1963 年海河、1981 年长江和黄河上游、1998 年长江和嫩江等大洪水的预报，为合理制订防洪措施，减轻洪水灾害发挥了显著作用。

编制洪水预报方案，要求使用不少于 10 年的水文气象资料，且资料系列质量可靠，包括大、中、小洪水各种代表性年份和足够代表性的场次洪水。洪水预报方案建立后，应进行精度的评定和检验，衡量方案的可靠程度，确定方案的精度等级。随着水文资料的积累，应进行预报方案的评价和修订。

洪水预报方法主要有河道洪水预报和流域降雨径流预报两种。河道洪水预报以天然河道中的洪水波运动理论为基础，由河道上游断面的洪水水位和流量过程预报下游断面的洪水水位和流量过程，主要包括相应水位（流量）法、河道流量演算等，其预见期即洪水波从河道上断面传播至下断面所经历的时间。流域降雨径流预报依据降雨形成径流的原理，直接根据流域实时降雨，通过产流、汇流计算，预报流域出口断面的洪水水位和流量过程，其预见期即流域内主要降雨结束至出口断面洪峰出现所经历的时间。

洪水预报主要采用的预报模型包括新安江模型、水箱（TANK）模型、前期影响雨量指标（API）模型、萨克拉门托（SAC）模型等以物理成因机制为基础的集总式流域水文模型，其核心为模型的结构和参数。随着现代科学技术的

发展，对基于更多流域空间分布特性的分布式流域水文模型的研究越来越多，如 SHE 模型、TOPKAPI 模型等，应用前景较好。

洪水预报按服务对象，可划分为天然河道洪水预报、施工期洪水预报和运行期洪水预报等。

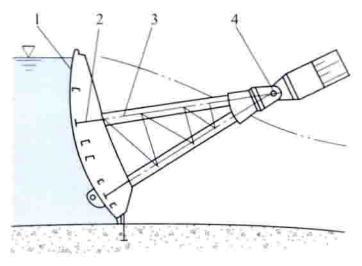
天然河道洪水预报　利用天然河道中洪水波运动规律，根据河道上游断面的水位（流量），通过建立上、下游断面的水位（流量）相关或流量演算方法，预报下游断面未来的水位（流量）；也可根据流域内发生的降水，采用合适的水文模型，建立降雨径流关系，预报下游出口断面未来的水位（流量）。

施工期洪水预报　水利水电工程通常施工期较长，需根据不同施工阶段的特点，开展相应的洪水预报工作，以保证在建工程的度汛、人员和设备的安全。在围堰和导流建筑物施工阶段，需要预报施工河段及围堰上、下游水位和流量，且由于工程防洪标准通常较低，需要开展好大洪水预报的同时还应开展好中小洪水的预报。特别是在基坑开挖、浇筑混凝土期间，特殊情况需根据预报洪水的大小对基坑是否过水进行决策。截流施工阶段，除需要预报流量外，还需要对截流时的导流洞（明渠）分流比、龙口落差和流速等水力要素进行预报。截流后在工程施工、蓄水同步进行时，需预报入库洪水和库水位。同时，根据工程施工布置情况，需要对沿河布置的施工料场、生活区以及其他相关场地等开展水位预报。施工期洪水预报方法与天然河道洪水预报基本相同，由于工程施工对所在河段水流条件的影响，水利水电工程施工期洪水预报方案应根据施工进度进行调整。

运行期洪水预报　水利水电工程建成后，不同程度地改变了天然河道的水力要素和水文特性，且为满足其运行调度的需要，需开展水利水电工程运行期洪水预报，其预报方法与天然河道洪水预报基本相同。对于具有一定调节能力的水库，入库洪水主要包括上游来水（入库水文站监测）和库区、库面入流组成，同时受水库调节影响，应在入库洪水预报的基础上，开展水库调洪演算，对库水位、出库流量进行预报。当上游建有梯级水电站时，入库洪水预报还应考虑上游电站运行的影响。

huxing zhamen

弧形闸门　(radial gate)　挡水面板呈圆弧形，绕水平铰轴旋转而启闭的闸门，简称弧门。门叶由面板、梁系、支臂组成的结构件、支铰及水封装置等构成，门叶主梁和支臂组成受力主框架，承受由面板和次梁等构件传递来的水压力，并通过支铰传至混凝土结构，如图所示。弧形闸门的支铰轴线与弧形面板的圆柱中心线重合，作用在弧面上的总水压力作用线通过支铰轴线，其启闭力一般较相同孔口尺寸和设计水头的平面闸门小。弧形闸门泄流时水流比较符合闸下自由出流的流态，闸墩侧面无凹型门槽，水力学条件较好，多作为泄水孔口的工作闸门。



露顶式弧形闸门示意图

1—面板；2—梁系；3—支臂；4—支铰

门叶　门叶主框架分主横梁式和主纵梁式两种。主横梁式多用于宽扁型孔口，一般由主横梁和左右支臂的承压构件组成水平主框架，支臂形式有直支臂和斜支臂两种，后者多用于孔口宽度大的露顶式弧形闸门；当孔口宽度特别大时，也有采用两根以上直支臂的水平主框架的。主纵梁式多用于高窄型孔口，一般由主纵梁和每侧支臂的承压构件组成垂直主框架。当孔口特别高时，也有采用每侧支臂含两根以上承压构件的垂直主框架的；特窄孔口可采用一根主纵梁和一根支臂的结构。弧形闸门的面板一般设在上游侧。用于船闸输水廊道中的反向弧形闸门，其面板设在下游侧，以减免充水时门井水面波动和水流挟气等现象。

支铰由活动铰链、铰轴和固定铰座组成，安装位置应尽量高出下游水面。支铰有圆柱铰、圆锥铰、球铰等形式。圆柱铰结构简单，制造、安装方便，应用普遍；圆锥铰多用于侧推力较大的斜支臂弧形闸门；球铰对门叶结构的变位和制造、安装偏差有较大的适应性，但结构较复杂。

露顶式弧形闸门常采用 L 形断面侧水封和 I 形断面底水封；工作水头 80m 以下的深孔弧形闸门多采用方头 P 形断面侧水封和 I 形断面底水封。顶水封形式较多，除保证全关时的封水外，还需避免启闭过程的射水。对工作水头在 100m 以上的深孔弧形闸门，偏心圆柱铰＋压紧式水封和充压式水封两种新的止水形式已在龙羊峡、小浪底、天生桥一级等十多个工程中得到成功运用。为达到更好的封水效果，两种新型止水装置的外侧仍需设置常规水封。

埋件　用于封水、支承和传递荷载，包括侧轨、底坎和支铰座承载构件，深孔弧形闸门还需有顶楣、安装顶水封装置的结构件等。中低水头弧形闸门的底坎和侧轨均与混凝土面齐平；采用偏心铰压紧式水封和充压式水封的深孔弧形闸门，需采用突扩、突跌式体型的门槽及相应的埋件。

工程实例　中国已建大型弧形闸门的规模已居世界前列。五强溪水电站溢洪道露顶式弧形闸门宽 19m，高 23m，总水压力 51 000kN；草街航电枢纽冲沙闸露顶式弧形闸门宽 14.8m，高 25.5m，总水压力 54 350kN。小湾水电站坝身底孔弧形闸门宽 5m，高 7m，设计水头 160m，总水压力 108 500kN；溪洛渡水电站泄洪洞弧形闸门宽 14m，高 12m，设计水头 65m，总水压力 145 800kN。

hudiefa

蝴蝶阀　(butterfly valve)　安装在水轮机蜗壳前的引水钢管上，活门扁平呈蝶形的阀门。蝴蝶阀主要由阀体、活门、阀轴、密封装置、操作机构及附属设备组成。蝴蝶阀启闭时活门绕阀轴回转。一般在水轮发电机组事故、导叶漏水严重和机组检修时关闭，正常运行和其他状态均处于全开位置。蝴蝶阀全开时活门处在水流中，水力损失较大，但外形尺寸小，结构简单，质量小，一般用于 250m 以下的水头。委内瑞拉的塔瓜扎（Taguaza）电站已用到 640m。

阀轴布置形式　分立轴和卧轴两种。立轴蝴蝶阀的阀体分半面在水平位置，操作机构设在阀的上部，便于运行维护，占地面积较小，见图 1（a）。下部为止推轴承，常由于沉积泥沙引起磨损，发生活门下沉而影响密封性能。卧轴蝴蝶阀的阀体分半面在垂直位置，不需止推轴承，无积沙问

题，结构简单，成本低，使用较多，见图1（b）。

阀体 阀体是蝴蝶阀的主要部件，水流由其中通过，承受水压力，支持蝴蝶阀的全部部件。除低水头、小直径的阀体用铸铁铸造外，一般均用铸钢或钢板焊接；直径在4m以上的阀体，受运输条件的限制往往分瓣。

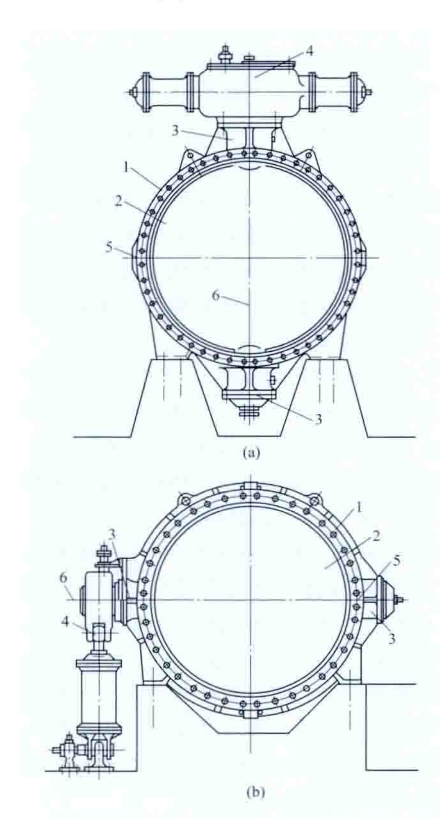


图1 阀轴布置形式

（a）立轴蝴蝶阀；（b）卧轴蝴蝶阀

1—阀壳；2—活门；3—轴承；4—操作机构；5—分半面；6—阀轴线

活门 有菱形、铁饼形、双平板形等，见图2。大直径活门一般做成菱形或铁饼形，均为中空结构，可采用铸铁、铸钢或经焊接而成。活门根据运输条件由2瓣或3瓣组成。双平板形活门两侧各有一块圆形平板，由若干沿水流方向的筋板连接，全开时筋板间也过水，因此水力损失小，全关时密封面不通过阀轴，减少漏水。双平板形活门应用很广，但其结构不便分瓣，直径受到运输条件限制。

阀轴 对于直径较小、水头不高的整体活门，可用贯穿活门的整体阀轴；对于水头较高，或直径较大的分瓣活门，可采用与活门中段做成一体的阀轴，或用螺栓固定在活门上的两段装配阀轴。阀轴轴承一般采用铸锡青铜轴瓦压装在钢套上，用螺栓和阀壳固定，黄油润滑。

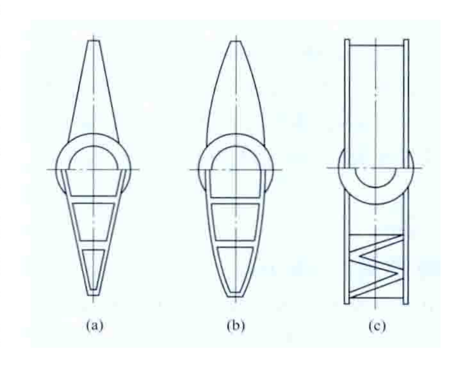


图2 菱形、铁饼形及双平板形活门

（a）菱形；（b）铁饼形；（c）双平板形

密封装置 活门的外圆密封有两种，充气式橡胶围带密封用于转90°的活门上，密封气压大于水压0.2～0.4MPa，见图3（a）。青铜板或硬橡胶板和不锈钢组成的密封用于转80°～85°的活门，靠关闭的操作力将活门压紧在阀壳上止水，见图3（b）和图3（c）。对于菱形和铁饼形活门，与阀轴连接处设有端部密封，一般用胀圈式或橡胶围带式密封。有的蝴蝶阀具有工作和检修两套密封，检修密封用水压操作，投入后可更换橡胶工作密封。

操作机构 水头不高的中小型蝴蝶阀用手动或电动操作，大多数用油压或水压操作。为增加事故关闭的可靠性，卧轴蝴蝶阀可用重锤关闭。液压操作有环形接力器、导管接力器、刮板接力器、摇摆接力器几种，并有单缸和双缸之分。摇摆接力器结构简单、可靠，尺寸小，广泛应用于卧轴蝴蝶阀上。

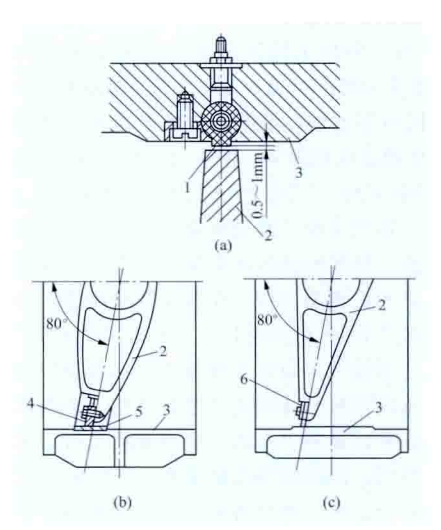


图3 活门的外圆密封

（a）充气式橡胶围带密封；（b）青铜板密封；（c）硬橡胶板密封

1—空气围带；2—活门；3—阀体；4—青铜板封水环；5—不锈钢衬；6—橡胶封水环

附属设备 包括旁通阀、空气阀和伸缩节等。旁通阀用于蝴蝶阀开启前向阀后钢管和蜗壳充水，使活门能在接近均压时开启，其直径一般取蝴蝶阀直径的1/10～1/7。空气阀用于旁通阀充水时排气及蝴蝶阀紧急关闭时补气，其直径一般为蝴蝶阀直径的7%～10%。伸缩节方便于蝴蝶阀的安装和拆卸。为防止活门意外动作，蝴蝶阀设有锁锭装置。

huapo

滑坡 (landslide) 斜坡上的岩体或土体在重力作用下沿贯通的滑动面发生滑动的现象。滑坡发生前往往有蠕动变形的迹象。滑坡是分布最广的边坡破坏形式，是山区常见的地质灾害，见图。



长江三峡工程库区新滩滑坡

滑坡形态特征 发育完全的典型滑坡，通常具有特定的形态和结构特征，是鉴定滑坡的主要标志。

(1) 滑坡体(滑体)。向下滑动的岩(土)体部分，表面起伏不平，裂缝纵横分布。在滑坡前缘如舌状向前伸出部分称滑坡舌，滑坡前缘因受挤压而隆起的部分称滑坡鼓丘，滑坡体上因各段滑动速度差异而形成的台坎称滑坡台坎。滑坡体上的裂缝有后缘的拉张裂缝、边缘的剪切裂缝、鼓丘部位的鼓胀裂缝及滑坡舌部位的扇形张裂缝等。

(2) 滑动面和滑坡床。滑动面简称滑面(带)，系指滑坡体沿其滑动的面(带)，大多由软弱的地质结构面所构成。滑动面以下稳定的岩(土)体称为滑坡床，简称滑床。

(3) 滑坡壁。滑坡体后缘滑面的出露部位，大多陡如壁状，在平面上多呈弧形的圈椅状。

滑坡形成因素　有斜坡体的内部因素和外部因素两类。

(1) 内部因素。包括组成斜坡岩土体的性质、地质构造、岩土体结构及斜坡地形等。由黏土、页岩、泥岩、泥质片岩等地层组成的斜坡往往容易形成滑坡。区域构造复杂、新构造活动地区，常出现巨型、大型滑坡及滑坡群。岩质边坡中的滑坡多沿顺坡向结构面滑动。高陡边坡坡脚处应力集中，易遭受剪切破坏而产生滑坡。

(2) 外部因素。包括水的作用、地震及人为因素等。大多数滑坡发生在雨季，表明水对岩土体的物理力学性质及斜坡附加载荷的改变起着重要的作用。强烈地震引起的剧烈振动常促使滑坡的发生。水流冲蚀或开挖坡脚，或增加坡体上部载荷，往往破坏自然斜坡的稳定而引起滑坡。

滑坡分类　按力学特性，可分为牵引式、平移式、推移式滑坡；按岩体结构特征，可分为均质滑坡、顺层滑坡和切层滑坡；按滑坡体岩性组成特征，可分为土质滑坡与岩质滑坡；按滑坡体的规模，可分为小型滑坡(体积小于10万m^3)、中型滑坡(体积为10万～100万m^3)；大型滑坡(体积为100万～1000万m^3)、巨型滑坡(体积大于等于1000万m^3)；按滑动稳定周期，可分为古滑坡、新滑坡；按滑动面埋深或滑体厚度，可分为浅层滑坡、中层滑坡、厚层滑坡、深层滑坡。

滑坡防治措施　包括：①排水。拦截或旁引滑体外的地表水，进行滑体表面防渗和疏排滑体内的地下水，以消除或减轻水对滑坡的危害影响。②改善滑体的力学平衡条件，如上部削坡、在坡体下部堆土(石)压坡或修建支挡建筑物(挡土墙、抗滑桩等)、增加抗滑力(预应力锚索、锚桩等)。

huaxue guanjiang

化学灌浆　(chemical grouting)　将一定比例的化学材料(有机或无机材料)配制成溶液，用专用泵将其灌注到岩土孔隙或混凝土裂缝内，经渗透、扩散、胶凝固化后，达到防渗或加固目的的工程技术。对于水泥灌浆难以成功或收效甚微的工程问题，如对断层和破碎带的处理、对砂层和岩石中小于0.2mm微细裂隙的防渗处理、对混凝土微细裂缝的缺陷处理灌浆等，常采用化学灌浆。

化学灌浆的主要特点是：①溶液黏度低，可灌性和渗透性好。凡是水能灌入之处，化学溶液也可灌入；水难灌入的部位，化学溶液则可慢慢渗入。②溶液和胶凝时间可以控制，有利于施工。③溶液的胶凝体或固结体稳定性和耐久性较好，不受稀酸、稀碱或某些微生物的侵蚀。④施工工艺要求严格。⑤化学材料一般具有不同程度的毒性，作业时要求做好安全防护和职业健康防护工作。

分类　按作用分类，可分为防渗堵漏和固结补强两类，前者灌浆材料主要有水玻璃类、丙烯酰胺类、丙烯酸盐类、木质素类和聚氨酯类，后者灌浆材料主要有环氧树脂类、甲基丙烯酸酯类；按灌入对象分类，可分为基岩化学灌浆、混凝土裂缝化学灌浆、粉细砂地基化学灌浆等。

施工工艺　化学灌浆的施工工序、钻灌方式与水泥帷幕灌浆基本相同，但由于化学灌浆材料的特点，灌浆方式都采用纯压式，即在灌浆过程中，浆液的流动只有一个方向，不允许浆液从灌入部位返出后再循环。

化学灌浆方法根据材料配方的不同，分为单液法和双液法两种：①单液法。灌注前将溶液的各组分依照规定的比例和加入的顺序一次混合好，用泵压送到灌浆部位。②双液法。将预先已配制成的两种溶液分别装于各自的容器内，使用比例泵依照规定的比例送浆，使双液在灌浆部位附近的混合器中混合后压入，或者是将双液直接压入灌浆部位，在该部位内混合。

常用的化学灌浆泵有手压浆泵、各种形式的比例泵、可控管调速的齿轮泵、隔膜计量泵等。

Huai He shuixi shuineng ziyuan

淮河水系水能资源　(hydropower resources of Huaihe River System)　据《中华人民共和国水力资源复查成果(2003年)》统计，淮河水系水能资源理论蕴藏量为79.77亿kW·h/a，占中国水能资源的0.13%；其中技术可开发资源装机容量591.6MW、多年平均年发电量17.02亿kW·h，占中国水能资源的0.069%。

淮河水系流域面积18.7万km^2，发源于河南省桐柏县的桐柏山，流经湖北、河南、安徽、江苏四省，干流长1000km。淮河水系支流众多，水系分散，各支流源短流急，水能资源不多。干流洪河口以上河道坡降相对较大，水系水能资源主要分布于该河段，但因径流量较少，技术可开发的水电站的装机规模不大，都属中小型。已建的梅山、佛子岭、响洪甸水库以防洪、灌溉为主，结合发电。

huanjing baohu he shuitu baochi gongcheng touzi

环境保护和水土保持工程投资　(cost of environmental protection and water-soil conservation works)　用于为减轻或消除水电站工程项目兴建对环境的不利影响所采取的各种保护工程和措施的投资。

环境保护工程包括水环境保护工程、大气环境保护工程、声环境保护工程、固体废物处置工程、地质环境保护工程、土壤环境保护工程、陆生生态保护工程、水生生态保护工程、人群健康保护工程、景观及文物保护工程、环境监测工程及其他。

水土保持工程包括永久工程占地区、施工营地区、弃渣场区、土石料场区、施工公路区、库岸影响区等水土流失防治区内的水土保持工程措施、植物措施、水土保持监测工程及其他。

环境保护和水土保持工程投资根据不同阶段设计深度和项目类别，按工程量乘以工程单价或单位造价指标计算。

huanliu

缓流 (subcritical flow) 弗劳德数 (Froude number) 小于1时的明渠水流形态。$Fr=v/\sqrt{gh}$，式中 v 为明渠断面平均流速，h 为明渠内水深，g 为重力加速度。弗劳德数是流体力学中表征流体惯性力和重力相对大小的一个无量纲数。平底水槽水流或平原河道中水的流动常呈明渠缓流。

明渠水力学中，按 $Fr>1$ 或 $Fr<1$ 划分为急流或缓流，$Fr=1$ 时为临界流。

明渠缓流特性：①$Fr<1$ 表明明渠流速 v 小于静水中的波速 $c=\sqrt{gh}$，流动若受干扰，其扰动波将能向上游传播，如挡水建筑物的回水可影响到上游较远的范围；②$Fr<1$ 表明水流单位动能小于单位势能，水流惯性力作用小于重力作用；③明渠缓流特性还可由断面比能 E_s 与水深 h 的关系说明（见急流）。缓流的条件是

$$h>h_{cr},\ \frac{dE_s}{dh}>0$$

式中 h_{cr} 为临界水深。

另外，常用水面比降 i 大于或小于临界比降 i_{cr} 来判定明渠中是急流还是缓流。缓流的条件是

$$i<i_{cr}$$

明渠中缓流到急流的过渡形式，通常是跨越临界水深的跌水曲线（见堰流）。

Huang He shangyou shuidian guihua

黄河上游水电规划 [hydropower development planning of the upper reaches of Huanghe (Yellow) River] 黄河是中国第二大河，发源于青藏高原巴颜喀拉山北麓，流经青海、四川、甘肃、宁夏、内蒙古、山西、陕西、河南、山东等9省（自治区、直辖市），于山东省垦利县注入渤海。干流全长5464km，流域面积79.5万 km^2。按流域特点划分为上、中、下游3个河段，内蒙古托克托县河口镇以上为上游，河口镇至河南郑州桃花峪为中游，桃花峪以下为下游。

黄河上游干流水电规划分为湖口至尔多河段、茨哈至羊曲河段、龙羊峡至青铜峡河段。

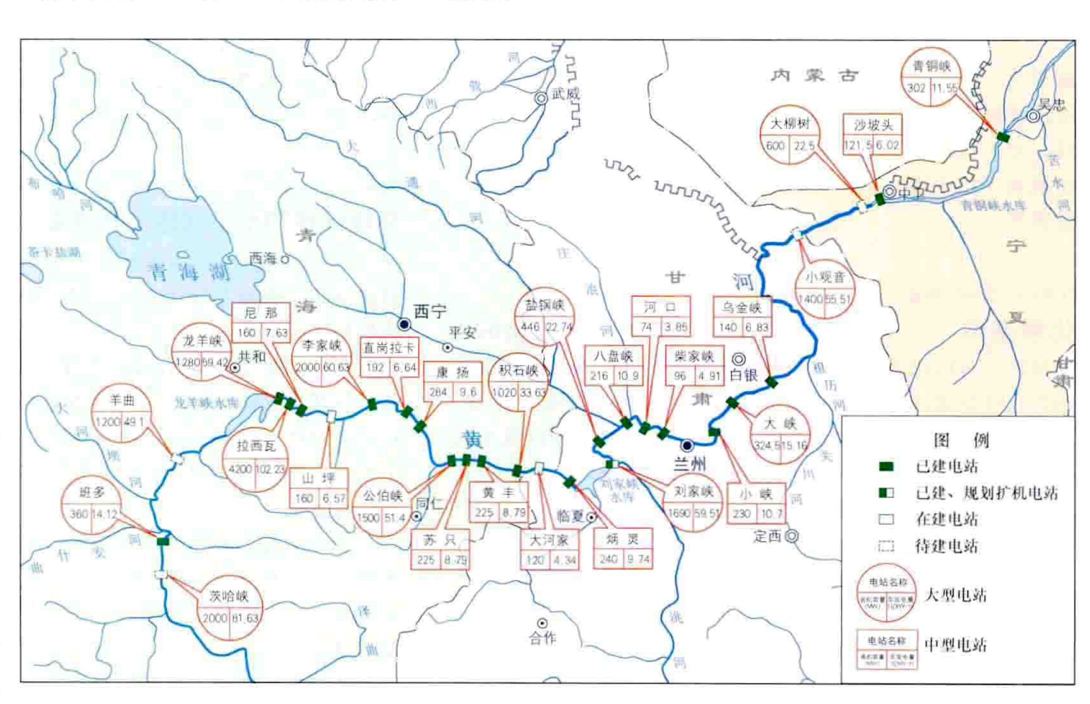
湖口至尔多河段，根据国家发展和改革委员会水电前期工作安排，湖口至尔多河段水电规划工作正在开展。

茨哈至羊曲河段，2002年，原国家计划委员会批复了《黄河干流茨哈至羊曲河段水电规划》，规划按3级开发，总装机规模3560MW，自上而下分别为茨哈峡、班多和羊曲。

龙羊峡至青铜峡河段，该河段规划设计工作在中国开展得较早，自1955年全国人大一届二次会议批准《黄河综合利用规划技术经济报告》以来，多家设计单位对黄河干流梯级工程布局做了大量的勘测、规划和设计工作，提出了诸多成果。根据以往规划成果，该河段按25级开发，总装机规模17 250MW，自上而下分别为龙羊峡、拉西瓦、尼那、山坪、李家峡、直岗拉卡、康扬、公伯峡、苏只、黄丰、积石峡、大河家、炳灵（寺沟峡）、刘家峡、盐锅峡、八盘峡、河口、柴家峡、小峡、大峡、乌金峡、小观音、大柳树、沙坡头、青铜峡，见图。

在上游河段中，青海龙羊峡至宁夏青铜峡河段径流丰富，落差巨大，川地与峡谷相间，地形及地质条件较好，是水电开发的重点河段。黑山峡以下至河口镇，黄河流经宁夏和内蒙古河套平原，河道展宽平缓，是中国重要粮食基地之一。黑山峡至青铜峡的中卫和中宁灌区、青铜峡以下的青铜峡灌区和内蒙古河套灌区是自秦汉起即开始开发，具有悠久历史、规模较大的集中连片灌区，仰赖黄河干流供水。兰州市位于上游中段沿岸，海拔高程较低的部分市区防洪标准不高。由于黄河干流在宁夏流向改为自南向北，春季上游河道解冻时间早于下游，造成冰塞，使沿黄河两岸农田和居民点受到凌汛威胁和灾害，因此黄河上游干流的开发除以发电为主外，还兼有灌溉、防洪与防凌任务。龙羊峡水电站（多年调节）、刘家峡水电站（年调节）调节库容分别为193.5亿、41.5亿 m^3，是黄河上游两座重要的调节水库，两水库在发电、防洪、防凌、灌溉、供水等方面发挥了重要作用。

黄河上游茨哈以下河段中，茨哈峡、羊曲、小观音、大柳树等4座水电站尚未开工建设，其余均已建成投产发电。



黄河上游茨哈至青铜峡河段水电站布置图及开发现状

Huang He shuixi shuineng ziyuan

黄河水系水能资源 [hydropower resources of Huanghe (Yellow) River System] 据《中华人民共和国水力资源复查成果(2003)》统计，黄河水系水能资源理论蕴藏量10MW及以上的河流155条，理论蕴藏量3794.14亿kW·h/a，其中干流2875.65亿kW·h/a，占75.8%；支流918.49亿kW·h/a，占24.2%。黄河水系技术可开发装机容量37 342.5MW，多年平均年发电量1360.96亿kW·h。黄河水系水能资源量占中国水能资源的比重为6%。水系干支流水能资源量的分布见表1。

黄河干流全长5463.6km，流经青海、四川、甘肃、宁夏、内蒙古、陕西、山西、河南、山东等省(自治区)，注入渤海。黄河支流较多，但流域面积大于1万km^2的仅有洮河、湟水、祖厉河、清水河、大黑河、无定河、汾河、渭河、伊洛河和沁河共10条。流域内平均年降水量仅约400mm，除黄河干流具有丰富的水能资源外，支流的水能资源量很小。干流的理论蕴藏量占全水系的75.8%，技术可开发资源量占91.2%。黄河干流划分为上、中、下游3个河段。

内蒙古托克托县河口镇以上为黄河上游。黄河上游河段干流长3472km，流域面积42.8万km^2，汇入流域面积1000km^2以上的较大支流有43条。自河源至玛曲段长1182km，因水量小且缺优良坝址，可开发水能资源较少。玛曲至青铜峡区间，黄河流经高山峡谷，出龙羊峡后川峡相间，落差集中，水能资源十分丰富，是重点水电基地之一。青铜峡至河口镇，黄河流经宁蒙平原，河道展宽，比降平缓，可开发水能资源较少。

河口镇至河南郑州桃花峪为黄河中游。黄河中游河段干流长1206km，流域面积34.4万km^2，汇入的较大支流有30条。河段内绝大部分支流地处黄土高原地区，水土流失十分严重，是黄河泥沙的主要来源区。河口镇至禹门口区间是黄河干流上最长的一段连续峡谷，水能资源较丰富，是黄河上第二个水电基地。

桃花峪以下为黄河下游。黄河下游河段干流长786km，流域面积2.3万km^2，汇入的较大支流只有3条，下游河道为地上悬河，没有可开发水能资源。黄河干流水能资源统计见表2。

Huang He zhongyou shuidian guihua

黄河中游水电规划 [hydropower development planning of the middle reaches of Huanghe (Yellow) River] 据黄河水利委员会1997年编制的《黄河治理开发规划纲要》，黄河中游河段共规划万家寨、龙口、天桥、碛口、古贤、甘泽坡、三门峡、小浪底、西霞院和桃花峪10个梯级枢纽(见下图)，共利用水头666.3m，总库容543.1亿m^3，总装机容量8818MW，多年平均年发电量268.6亿kW·h。

黄河干流自内蒙古自治区托克托县河口镇至河南省郑州市桃花峪为中游河段，河段长1206km，落差890m，其上段自河口镇到禹门口为峡谷河段，壶口瀑布位于该河段，两岸为山西、陕西两省黄土丘陵沟壑区，是黄河泥沙的主要来源。禹门口至潼关有汾河和渭河两大支流汇入，是洪水的主要来源，该河段为河道宽浅散乱的游荡性河流。三门峡以下至小浪底又为峡谷段。小浪底以下河谷逐渐展宽。据此确定黄河中游河段的开发任务为防洪、减淤、灌溉、发电、供水和防凌等。

1955年7月中国第一届全国人民代表大会第二次会议通过了由黄河水利规划委员会编制的《黄河综合利用规划技术经济报告》，确定在中游首先建设三门峡水利枢纽，担负防洪、发电等综合利用任务。三门峡枢纽建成后，黄河水利委员会多次研究托克托至禹门口的开发方案，1997年编制的《黄河治理开发规划纲要》把原规划的以发电为主的多级低水头径流式水电站开发方案改为以防洪、减淤、发电、供水和灌溉为开发目标的有控制性水库枢纽的开发方案。该方案保留了著名的壶口瀑布景观。

开发方案中，碛口、古贤、三门峡和小浪底4座较大水库是控制黄河中下游洪水、调节泥沙的骨干枢纽，同时还可提供电力和电量。三门峡、天桥、万家寨、小

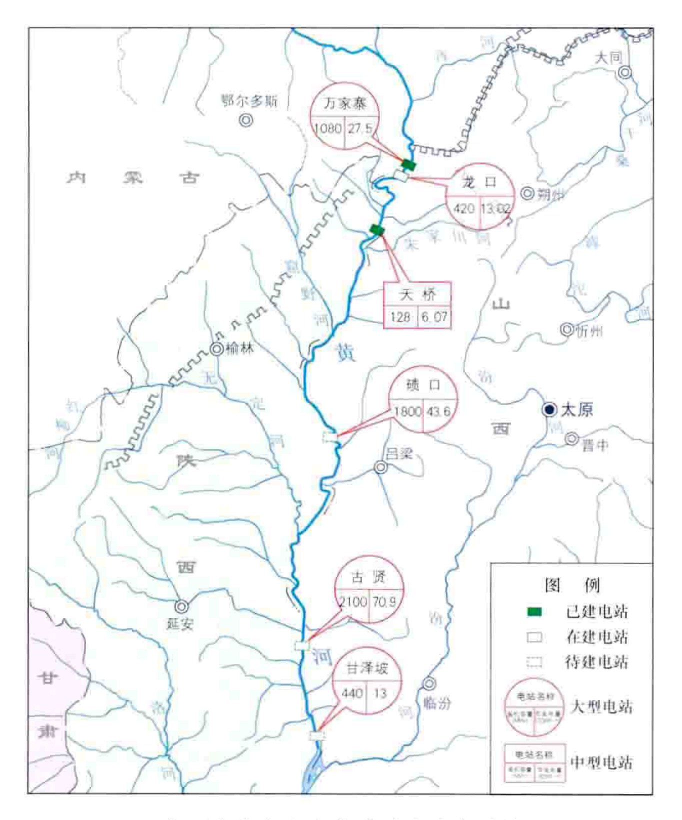
表1 黄河水系可能开发水能资源统计表

水系名称	流域面积(km^2)	多年平均流量(m^3/s)	河道长度(km)	天然落差(m)	理论蕴藏量(亿kW·h/a)	技术可开发资源		
						电站数量(座)	装机容量(MW)	年发电量(亿kW·h)
黄河水系					3794.14	535	37 342.5	1360.96
干流	794 712	1798	5463.6	4480	2875.65	57	34 198.9	1215.28
洮河水系	25 527	156	673.1	2631	169.14	40	743.9	35.52
湟水水系	32 863	153.5	373.9	2635	172.55	62	741.3	36.96
汾河水系	39 471	63.7	693.8	1975	29.44	23	181.3	6.56
渭河水系	134 766	301.2	818.0	2905	257.40	125	518.4	21.72
伊洛河水系	18 881	113.8	446.9	1647	47.74	37	245.8	9.48
沁河水系	13 532	47.9	485.1	1844	24.11	55	189.7	8.55
其他支流					218.11	136	523.2	26.90

表2 黄河干流水能资源统计表

河流名称	流域面积(km^2)	多年平均流量(m^3/s)	河道总长(km)	天然落差(m)	理论蕴藏量(亿kW·h/a)	技术可开发量		
						电站数量(座)	装机容量(MW)	年发电量(亿kW·h)
黄河上游	428 235	991	3471.6	3496.0	1769.98	42	25 390.6	957.41
黄河中游	343 751	1773	1206.4	890.4	960.25	15	8808.3	257.87
黄河下游	22 726	1798	785.6	93.6	145.42			
干流合计	794 712		5463.6	4480.0	2875.65	57	34 198.9	1215.28

浪底4座枢纽已经建成；万家寨水利枢纽第一台机组于1998年11月发电，2002年通过竣工验收；小浪底水利枢纽主体工程于1994年开工，1999年底第一台机组发电，2001年竣工。



黄河中游水电站布置图及开发现状

huitian guanjiang

回填灌浆（backfill grouting） 在混凝土衬砌顶部或回填混凝土的周边，对混凝土浇筑未能浇实而留有空隙部位进行的灌浆。主要作用是提高建筑物的整体性，增加密实性和防渗性。

回填灌浆应用最多的是地下工程，如隧洞衬砌顶拱部分和平洞混凝土封堵体的顶部。混凝土与岩石之间的回填灌浆，要求在衬砌混凝土达到70%设计强度后尽早进行。

回填灌浆孔布设在顶拱部位（也可预埋管路），孔深穿透衬砌层深入岩石10cm。灌浆依照分序加密的原则进行，使用水灰比为0.5～0.6的浓水泥浆灌注，当注入量大时，灌注水泥砂浆。

质量检查一般是在该部位回填灌浆结束7天或28天后进行。合格的标准通常为：①单孔注浆法。在设计压力下，初始10min内向孔内注入水灰比为2的水泥浆量小于10L时。②双孔连通试验。在指定部位布置2个间距为2～3m的检查孔，向其中一孔注入水灰比为2的水泥浆，压力与灌浆压力相同，若另一孔出浆流量小于1L/min则为合格。③检查孔及芯样检查。探测钻孔及观察岩心浆液结石充填饱满密实，满足设计要求为合格。根据工程条件可选用上述一种或两种检查方法。

Huizhou Choushui Xuneng Dianzhan

惠州抽水蓄能电站（Huizhou Pumped Storage Power Station） 位于中国广东省惠州市博罗县城郊，距广州市约112km、惠州市20km、深圳77km，是一座周调节抽水蓄能电站。电站装机容量2400MW。电站设3回500kV出线，1回至南方电网500kV博罗变电站，2回至惠州500kV福圆变电站。

枢纽布置 枢纽工程由上水库、下水库、水道系统、厂房等组成，见图1。

上水库和下水库 上水库位于象头山小金河源头范家田山间盆地，下水库位于博罗县罗阳镇下礤村，地处榕溪沥河的上游，距上水库水平距离4.2km，上、下水库均具有天然径流，多年入库流量分别约为0.31m³/s和0.55m³/s。

上水库由1座主坝、4座副坝及库岸防渗系统（3个垭口和1座条形山）等组成，见图2。上水库正常蓄水位762.00m，相应库容3171万m³；死水位740.00m，相应库容431.4万m³。主坝为碾压混凝土重力坝，最大坝高53.10m，中间溢流坝段设3孔自由溢流堰，每孔净宽10m，堰顶高程为762.00m，堰面采用WES曲线，堰顶不设闸门。副坝一为混凝土重力挡墙，副坝二～四均为黏土心墙堆石坝，最大坝高39.80m。

下水库主要建筑物包括1座主坝和1座副坝。下水库正常高水位231.00m，相应库容3190.5万m³；死水位205.00m，相应库容423.9万m³。主坝为碾压混凝土重力坝，坝顶总长450m，坝顶高程236.17m，坝顶宽度为7m，最大坝高55.17m；中间河床溢流坝段，坝顶长34m，设3孔自由溢流堰，每孔净宽10m，堰顶高程为231.00m，采用自由溢流。副坝位于下水库主坝的左侧，为黏土心墙堆石坝，坝顶长220.00m、宽7m，坝顶高程237.36m，最大坝高27.86m，坝体上游边坡坡度为1∶2.75，下游边坡坡度为1∶2.25。

水道系统 对应A厂和B厂各有一套水道系统。A厂水道系统总长为4493m，其中引水系统长3122m，尾水系统长1371m；B厂水道系统总长4487m，其中引水系统长2788m，尾水系统长1699m。A、B两厂引水系统均为一洞四机供水方式。隧洞主洞直径为8.5m，分岔后的引水支管

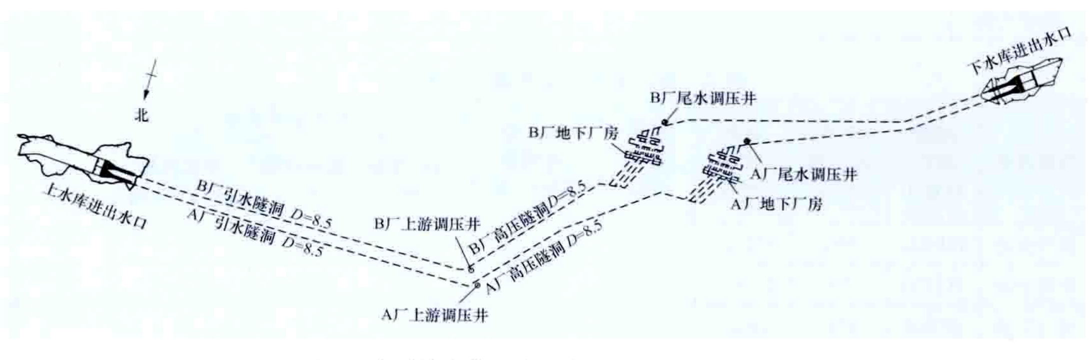


图1 惠州抽水蓄能电站布置图（单位：m）

管径为3.5m、尾水支管管径为4.0m。设置上、下游调压室，上游调压室为带上室的阻抗式调压室，调压室总高度为180.00m；尾水调压室为带上室廊道的阻抗式调压室，调压室总高度约为117.00m。上游调压室和尾水调压室连接管、升管、大井断面均为圆形，采用钢筋混凝土衬砌，衬砌厚0.6m。连接管、升管直径为8.5m，大井直径为16m。



图2　惠州抽水蓄能电站上水库

厂房　地下厂房分为A、B厂房。A、B厂房的主厂房、副厂房、安装间呈一字形布置，长度分别为96.5/99、26/26、29.5/30.5m，高度分别为48.25、32.8、26.75m，宽度均为21.5m。A、B厂房内各安装4台单机容量为300MW的立轴单级混流可逆式水泵水轮机组。水泵水轮机转轮直径3.86m，转速500r/min，吸出高度−70m。发电工况，最大、最小水头分别为557m和509m，额定出力为334MW。抽水工况，最大、最小扬程分别为561.56m和510.73m。发电电动机为竖轴三相空冷悬式，额定电压18kV，发电时，单机容量为300MW，功率因数为0.9；抽水时，功率因数为0.95。机组励磁采用自并激晶闸管静止整流励磁系统。

主变压器洞长143.9m，宽18.15m，高18.95m；A、B厂主变压器洞内均装有单台容量为360MV·A的500kV强迫导向油循环水冷却（ODWF）、带无励磁分接开关的三相五柱心式、户外、油浸、双绕组升压/降压变压器4台，500kV出线用GIS经高压电缆洞引至地面，A、B厂合并开关站。

工程施工　2005年1月主体工程开工，2009年5月首台机组投入运行，2011年5月第八台机组投入运行。

设计单位　广东省水利电力勘测设计研究院。

建设单位　中国南方电网有限责任公司调峰调频发电公司。

hunheshi shuidianzhan

混合式水电站　(composite type hydropower station)

因坝式水电站和引水式水电站各有优缺点，在适宜的条件下有些水电站既用挡水建筑物、又用引水系统共同集中发电水头，既有水库可调节径流，又可用较少的引水系统工程量取得较大水头。这类水电站称为混合式水电站，如中国的鲁布革水电站。

hunliushi shuilunji

混流式水轮机　(Francis turbine; mixed flow turbine)

轴面水流由径向进入、轴向流出转轮，将水流能量转换为旋转机械能的反击式水轮机。又称弗朗西斯水轮机。混流式水轮机的使用水头范围一般为30～700m，大型混流式水轮机水头多在400m以下。

结构与特点　混流式水轮机结构简单，主要部件包括蜗壳、座环、基础环、机坑、导水机构、导叶调节装置、转轮、主轴（见水轮机主轴）、导轴承（见水轮机导轴承）、主轴密封、尾水管等，见图1，图中同时标示出水流流向。蜗壳是引水部件，形似蜗牛壳体，一般由金属材料制成，断面呈圆形。水头较低时，亦可采用混凝土蜗壳。座环置于蜗壳和导叶之间，由上环、下环和若干固定导叶组成。导水机构由活动导叶、顶盖、底环等组成，有时也将调速环、拐臂、连杆等导叶调节装置归并入导水机构。转轮是水轮机的核心部件，将水流能量转换为旋转机械能，由上冠、下环、泄水锥和若干固定式叶片组成，其外形和各组成部分的配合尺寸根据其使用的水头不同而有所不同，转轮与主轴直接连接。尾水管是将转轮出口的水流引向下游的水轮机泄水部件，一般为弯肘形，小型水轮机常用直锥形尾水管。

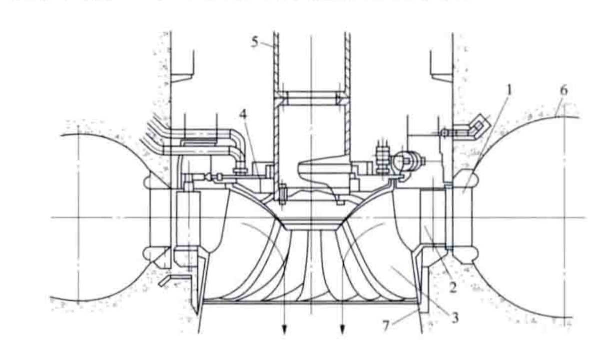


图1　混流式水轮机结构图

1—座环；2—导水机构；3—转轮；4—顶盖；5—主轴；6—蜗壳；7—尾水管

发展简史与趋势　1849年，美国人J.B.弗朗西斯（J.B.Francis，1815—1892）提出一种水流由外向内流动的同心式水轮机，如图2所示，其导向机构在转轮外部，尾水管呈圆锥形。该水轮机经不断改进、完善，形成了现代的混流式水轮机。混流式水轮机的发展趋势是高水头、大容量、高比转速和高效率。世界上使用水头最高的混流式水轮机安装于奥地利的豪依斯林（Haüsling）水电站，其最大水头为734m，单机输出功率为180MW。世界上单机输出功率最大的混流式水轮机为中国向家坝水电站（最大水头为113.6m）的水轮机，其额定输出功率761MW，最大输出功率812MW，转轮直径10.36m（中国生产），已投运；美国的大古力三厂（最大水头108.2m）第22～24号机组的水轮机，其额定输出功率为716MW，转轮的最大外径为9.9m。中国已投入运行的大型混流式水轮机还有三峡（最大水头113m）、龙滩（最大水头179m）、拉西瓦（最大水头220m）、小湾（最大水头251m）等水电站

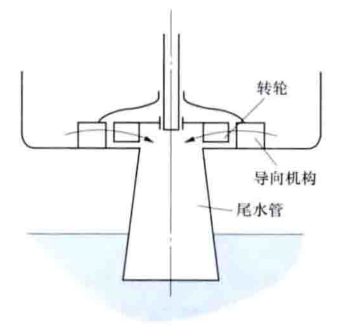


图2　弗朗西斯水轮机示意图

额定输出功率为710MW的水轮机；溪洛渡水电站（最大水头229.4m）水轮机的额定输出功率为784MW，最大输出功率为870MW。

hunningtu

混凝土 （concrete） 由胶凝材料将骨料胶结成整体的一种人工建筑材料。按胶凝材料的不同，可分为水泥混凝土、沥青混凝土（见沥青混凝土施工）、聚合物（如环氧）混凝土、石膏混凝土等。通常所称的混凝土是以水泥作胶凝材料，砂、石为骨料，与水按一定比例配合，经搅拌、成型、养护而得的水泥混凝土。它是一种坚固、耐久的建筑工程材料，用途极为广泛，常用于工业与民用建筑、水工建筑、交通等土建工程。

在混凝土中，水泥和水成为水泥浆，水泥浆包裹着砂子表面并填充砂子的空隙而形成砂浆，砂浆又包裹石子表面并充填石子的空隙，形成一个紧密的整体。其中，水泥浆是混凝土中的活性成分，硬化前它在砂石颗粒之间起润滑作用，使混凝土拌合物具有在浇筑时所需要的和易性，硬化后它将砂石牢固地胶结起来，成为具有较高强度的水泥结石。石子和砂分别称为混凝土的粗、细骨料，一般不与水泥浆起化学反应，其作用是构成混凝土的骨架，并减少混凝土由于水泥硬化而引起的收缩。混凝土拌合物具有可塑性，可以浇筑成各种形状和尺寸的结构物和构件。混凝土抗拉强度很低，用于板、梁、柱等结构时，需配置钢筋，构成钢筋混凝土。

为改善混凝土性能和降低水泥用量，常在混凝土中掺少量外加剂（如减水剂、加气剂、防水剂、速凝剂、缓凝剂等）和适量的掺合料。外加剂改性效果显著，已成为混凝土中不可缺少的成分。

为确保混凝土质量，不仅要合理选择原材料，结合试验正确进行混凝土配合比设计，而且应严格控制其配料、搅拌、振捣和养护各环节的质量（见混凝土质量控制）。

对混凝土强度的衡量，工程中常以其标准试件（边长为150mm的立方体试件）按照标准试验方法在28天龄期测得的具有95%保证率的立方体抗压强度大小，划分混凝土的强度等级。

有些水工混凝土，还须提出抗渗和抗冻的要求，分别以其承受水压的大小及经受冻融循环的次数，划分抗渗等级和抗冻等级。

不同容重的混凝土有其不同的使用功能：

(1) 普通混凝土：表观密度为1900～2700kg/m^3，一般为2400kg/m^{3}左右，在房屋、桥梁及水工建筑等土建工程中最为常用。

(2) 重混凝土：表观密度大于2700kg/m^3，常用于防辐射等防护混凝土或水利水电工程中的抗冲耐磨混凝土。

(3) 轻混凝土：表观密度小于1900kg/m^3，多用于保温、隔音等非承重混凝土，水工混凝土一般不使用轻混凝土。

hunningtu gongcheng shigong

混凝土工程施工 （concrete construction） 按设计要求，采用混凝土修建建筑物的实施过程。水电工程在修建坝、水电站厂房及其他各种水工建筑物时，广泛应用混凝土。混凝土工程的施工，需根据混凝土的品种、性能，施工对象的结构形式、受力条件和质量要求，施工时的气温以及其他施工条件等，采用相应的施工方法。混凝土工程施工的基本内容一般包括原材料准备、模板制作与安装、仓面准备、混凝土制备、运输、浇筑、养护、温度控制、质量控制和检查。

原材料准备 混凝土原材料主要包括水泥、骨料、水、掺合料和外加剂。每个工程所用的水泥品种应满足建筑物各部位的使用要求，以1～2种为宜，并固定厂家。水泥在运输和储存过程中应注意防水、防潮，不同品种的水泥分别储存到有明显标志的储罐或仓库；骨料根据优质、经济、就地取材的原则进行选择，可选择天然骨料、人工骨料，或两者互相补充。骨料堆存场地应有良好的排水设施，必要时设置遮阳防雨棚；各级骨料仓之间设置隔墙等措施，防止混料。拌和混凝土及混凝土养护用水必须选用经净化处理后的河水，未经处理的各类污水不得用于拌和和养护混凝土；掺合料和外加剂根据工程的技术要求通过试验论证确定。在运输和储存过程中注意防水、防潮，不得混入杂物，不同品种的掺合料和外加剂分别储存到有明显标志的储罐或专用仓库。

模板制作与安装 模板的设计、制作、安装应保证模板结构有足够的强度和刚度，能承受混凝土浇筑和振捣的侧向压力和振动力，确保混凝土结构外形尺寸准确、密封，防止产生位移和漏浆。模板安装按照设计提供的施工详图测量放样，并检查校正，安装过程中需设置防倾覆的临时固定设施。(见模板)

仓面准备 浇筑混凝土前，需进行的准备工作有：①建筑物地基的清理验收。对于岩基，需清除杂物和松动岩石，冲洗干净，排除积水；对于软基，当留有地基临时保护层时，需先行清除并处理好。设有垫层的，需将垫层铺好，必要时适当浸湿。②施工设施的准备，包括平仓、振捣和缓降设备。需用浇筑平台的，要准备好平台、脚手架等。③钢筋和预埋件的加工和安装。水工钢筋混凝土常用的钢筋为热轧Ⅰ～Ⅳ级钢筋，其中Ⅰ级为光圆钢筋，Ⅱ～Ⅳ级为带肋钢筋。预埋件主要包括止水、排水设施，伸缩缝缝面填料，冷却、灌浆管路以及观测仪器。预埋件的结构形式、位置、尺寸，以及所用材料的品种、规格、性能指标应符合设计要求和有关标准。④在已浇好的混凝土上面或侧面浇筑混凝土时，需做好工作缝的处理。一般事先用压力水、风砂枪、刷毛机或人工加工成毛面，并清洗干净。⑤仓面养护、保温措施的准备。

混凝土制备 按照确定的混凝土配合比，通过配料，将骨料、水泥、掺合料、水、外加剂等原材料使用拌和设备拌制成混凝土拌合物的过程（见混凝土制备）。不满足质量要求的混凝土拌合物按不合格料处理，不能用于水工主体建筑物。

运输 混凝土运输时应尽量缩短运输时间及减少转运次数，混凝土运输设备和运输能力的选择应与拌和、浇筑要求，以及仓面状况和平仓振捣能力相适应。混凝土运输方式一般有自卸汽车运输、混凝土搅拌运输车运输、缆机运输、门塔机运输及塔带机运输等。(见混凝土运输)

浇筑 常见的混凝土浇筑包括常态混凝土、碾压混凝土和预制混凝土浇筑。此外，还有多种特殊混凝土浇筑，如泵

送混凝土、喷射混凝土、自密实混凝土、堆石混凝土、真空作业混凝土、水下混凝土、预应力混凝土及模袋混凝土等。(见混凝土浇筑)

养护　混凝土浇筑完成后，及时采用洒水、喷雾、覆盖等措施进行养护，使混凝土在养护期内表面经常保持湿润。混凝土养护时间不宜少于28d，有特殊要求的部位还应适当延长养护时间。

温度控制　为防止大体积混凝土产生温度裂缝，必须在高温季节和低温季节采取必要的温控措施。高温季节的主要温控措施包括预冷混凝土、仓面喷雾、搭设遮阳棚、埋设冷却水管等。低温季节气温骤降频繁，而且往往伴随大风、低温，因此施工采取的方法主要是加热原材料，对拌和、运输和浇筑过程中的混凝土保温，对已浇筑的混凝土进行蓄热或加热保温养护，以及在混凝土中掺入一定量的外加剂增强防冻能力等。(见混凝土温度控制)

质量控制和检查　混凝土原材料、配合比、施工各主要环节及硬化后的混凝土外观和质量均应进行检验与监督。在混凝土施工过程中，应进行质量检验，掌握质量动态信息，进行统计分析，及时制定改进与提高质量的措施。(见混凝土质量控制)

hunningtu guliao

混凝土骨料　(concrete aggregate)　在混凝土中起骨架或填充作用的颗粒状材料。又称混凝土集料。一般为砂、石材料。骨料在混凝土中所占的比例无论体积或质量都是最大的。从骨料来源上分为天然骨料与人工骨料两类，从粒径上分为粗骨料和细骨料两种。粗骨料是指由天然岩石或砾石经破碎、筛分而得的粒径大于或等于5mm的颗粒。中国水工混凝土所用的粗骨料按粒径一般分为特大石（80～150mm或80～120mm)、大石（40～80mm)、中石（20～40mm)、小石（5～20mm）4级。细骨料是指粒径小于5mm的混凝土骨料。细骨料其按形成条件分为天然砂、人工砂，按细度模数F.M.分为粗砂（3.1～3.7)、中砂（2.3～3.0)、细砂（1.6～2.2)、特细砂（0.7～1.5)。

混凝土骨料应满足抗压强度、弹性模量、比重与密度、颗粒形状和表面状态、空隙率、细度模数、级配、热性能、有害物质含量、碱活性反应等质量技术要求。

抗压强度　骨料材质的抗压指标将直接影响混凝土的强度，所以骨料材料强度不宜低于混凝土的强度。一般水工混凝土骨料的饱和抗压强度应大于40MPa，普通混凝土骨料的抗压强度与混凝土强度等级之比一般不小于1.5。

弹性模量　岩石的物理力学性质之一，指岩石在弹性范围内的应力与应变之比。对混凝土的徐变和收缩有直接影响，弹性模量高，徐变量减小。

比重与密度　检验骨料比重的指标是视比重，又称表观相对密度，即表观密度与同温度水的密度之比。骨料密度分为表观密度和堆积密度。表观密度是指骨料颗粒单位体积（包括颗粒内封闭空隙）的质量。堆积密度是指骨料在自然堆积状态下单位体积的质量。DL/T 5388—2007《水电水利工程天然建筑材料勘察规程》中规定：对水工混凝土用天然砂砾骨料，粗、细骨料的表观密度应不小于2.55g/cm^3，细骨料的堆积密度宜不小于1.50g/cm^3，粗骨料的堆积密度应不小于1.60g/cm^3；对人工轧制骨料，粗、细骨料的表观密度应大于2.55g/cm^3，细骨料的堆积密度应大于1.50g/cm^3，粗骨料的堆积密度应大于1.60g/cm^3。

颗粒形状和表面状态　骨料颗粒形状有球形、棱形、片状、针状等。球形多为卵砾石及河砂，棱形为碎石，针片状多见于薄片岩石。球形骨料拌制的混凝土和易性好。碎石骨料表面粗糙，与水泥胶结良好，相同配合比的混凝土，其强度较卵石混凝土高。针片状颗粒拌制的混凝土和易性差，由于其表面积大，相比水泥用量也大。粗骨料中要求针片状颗粒含量小于或等于15%（经试验论证，可以放宽至25%)。

空隙率　骨料堆积体积中，颗粒之间的空隙体积占总体积的比例。人工砂空隙率小于40%，人工粗骨料空隙率小于45%。

细度模数（F.M.）　评价砂粗细程度的一项指标，用筛分试验中孔径小于5mm各号筛的累计筛余百分率的总和除以100来表示。人工砂的细度模数宜在2.4～2.8，天然砂的细度模数宜在2.2～3.0。

级配　组成骨料的不同粒径颗粒的比例关系，即骨料中含有不同粗细颗粒的比例构成。级配良好的混凝土水泥用量较少，且能制成和易性好、离析和泌水少的流态混凝土。

热性能　骨料的热性能主要有比热容、热导率、导温系数和热膨胀系数。它们与混凝土温度裂缝的关系密切，与混凝土的抗冻融能力有关。例如，石灰岩的热膨胀系数较低，约为4.4×10^{-6}/℃，一般是生产混凝土骨料的首选材料；天然卵砾石是一种不均质的混合料，用它拌制的混凝土，热膨胀系数约为5.5×10^{-6}/℃。

有害物质含量　有害物质包括黏土、淤泥、软弱颗粒、有机杂质、硫化物、云母及化学盐类等。这些杂质阻碍水泥与骨料胶结，妨碍水泥的正常水化或与水泥中的成分起化学反应，导致混凝土强度和耐久性降低。它们还可能引起需水量加大，减弱混凝土的物理性能。DL/T 5144—2001《水工混凝土施工规范》中规定：细骨料（砂）的含泥量小于或等于3%，云母含量小于或等于2%，粗骨料的含泥量小于或等于1%。

碱活性反应　骨料中含有一些特殊的盐类成分，能与水泥中的碱产生化学反应，其反应的生成物自身或吸水后体积膨胀，将导致混凝土开裂破坏，这类骨料称为碱活性骨料。碱活性反应通常可分为碱-硅酸反应和碱-碳酸盐反应两种类型。

(1）碱-硅酸反应。水泥中的碱与骨料中的活性二氧化硅成分反应产生碱硅酸盐凝胶（或称碱硅凝胶)。碱硅凝胶固体体积大于反应前的体积，而且具有强烈的吸水性，吸水后膨胀引起混凝土内部膨胀应力，进一步促进碱骨料反应的发展，最终使混凝土内部膨胀应力增大，导致混凝土开裂，发展严重的会使混凝土结构崩溃。某些黏土质岩、千枚岩等层状硅酸盐矿物中，细小的二氧化硅分散在岩石的基质中，膨胀要缓慢得多，这类碱活性反应也称碱-硅酸盐反应，实质上也是碱-硅酸反应。发生碱-硅酸反应的条件一般为：①水泥的含碱量超过0.6%；②活性骨料含量超过1%；③处于潮湿的环境中。

(2）碱-碳酸盐反应。骨料中含有白云石碳酸盐，这类岩石为白云石质石灰岩、方解石质石灰岩中的白云石等，与

水泥中的碱及活性骨料的碳酸盐起反应，形成镁的氢氧化合物——水镁石 [$Mg(OH)_2$]，使得混凝土膨胀。

碱活性试验方法有岩相法、化学法、砂浆长度法、岩石圆柱体法（仅针对碳酸盐岩进行）、砂浆棒快速法、混凝土棱柱体法。化学法和砂浆长度法由于和实际工程中的情况对应性差，或检测慢反应性的碱-硅酸盐活性骨料时容易发生漏判，一般不常采用。骨料使用前必须进行专门的试验鉴定，如存在碱活性成分，可采用低碱水泥或掺用粉煤灰等材料予以抑制。

hunningtu jiaozhu

混凝土浇筑 (placing of concrete) 将混凝土拌合物按照一定的次序、方向，分缝、分块、分层进行入仓浇筑的施工方法。根据混凝土种类的不同，混凝土浇筑的施工工艺各不相同，常分为常态混凝土浇筑、碾压混凝土浇筑及其他混凝土浇筑。

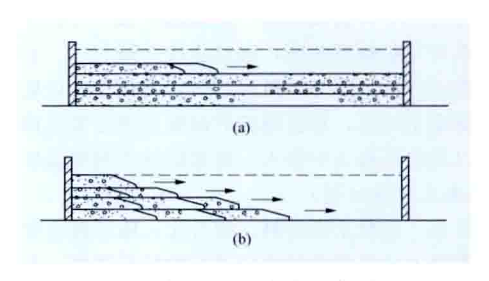
常态混凝土浇筑 采用振捣方式浇筑混凝土的工艺。混凝土浇筑要求振捣密实，在下面一层已浇的混凝土初凝前，需覆盖上层混凝土，使层间结合良好。混凝土浇筑的基本内容一般包括：①混凝土仓面设计；②混凝土施工缝处理；③混凝土分缝、分块及分层；④混凝土入仓及振捣。

混凝土仓面设计 对浇筑部位的浇筑过程进行规划，以确保混凝土浇筑按照技术要求和工序正常、有序进行。仓面设计的主要内容包括分析仓面特征、质量技术要求、选择施工方法、进行合理的资源配置和制定质量保证措施。仓面特征指浇筑部位的结构特征和浇筑特点。分析仓面特征，确定浇筑参数和进行资源配置，可避免周边部位的施工干扰。技术要求包括质量要求和施工技术要求。施工方法包括选择铺料厚度、铺料方法、铺料顺序、入仓设备规划等。资源配置包括设备、材料和人员配置。设备配置要合理配套，人员配置要分工明确，材料配置要品种齐全、数量充足，符合技术要求。

混凝土施工缝处理 对老混凝土表面进行处理，混凝土施工缝面达到无乳皮，微露粗砂，使新、老混凝土结合良好。处理方法包括冲毛、凿毛和化学处理剂刷毛。冲毛有低压水冲毛、风砂枪冲毛和高压水冲毛。凿毛是采用钢钎和风镐等工具凿除已硬化的混凝土表层，形成毛面。化学处理剂刷毛是利用化学制剂进行混凝土缝面处理。

混凝土分缝、分块及分层 混凝土分缝、分块及分层浇筑的厚度，需根据坝高、坝型、结构要求、温度控制要求、设备能力、施工条件及气温条件等综合因素确定。在满足温度控制要求的情况下，少分缝或采用通仓浇筑、采用较厚的浇筑层比较经济。通仓浇筑有利于提高机械化效率，加快施工进度，减少接缝灌浆和模板工程量，但需满足温控要求的浇筑能力和温控措施。分缝有横缝和纵缝两种形式。横缝按缝面形式分为：①缝面不设键槽，不灌浆；②缝面设竖向键槽和灌浆系统；③缝面设键槽，但不灌浆。纵缝分竖缝、斜缝、错缝和预留宽槽。横缝一般需在上、下游面附近设置止水系统。浇筑层厚度根据温度控制要求、模板形式、立模方式、结构特征、入仓能力等因素综合确定。采用较厚的浇筑层比较经济，可提高施工速度。

混凝土入仓及振捣 入仓方式主要有吊罐入仓、胶带机入仓、汽车直接入仓，其他还有泵送混凝土入仓、溜管及负压溜槽入仓。吊罐入仓是使用起重机械吊运混凝土罐入仓，适用范围较广，混凝土质量也容易得到保证。胶带机入仓连续、快速，需配备相应的仓面布料和振捣设备。汽车直接入仓速度快，但必须有确保混凝土施工质量的措施，铺料方法有端进法和端退法。铺料方法选择主要考虑混凝土温控要求、混凝土允许间隔时间、混凝土入仓设备及生产能力、混凝土级配和仓面结构特征等因素，分平铺法和台阶法两种。平铺法浇筑［见图（a）］是由一端开始向另一端铺料，水平分层进行。当浇筑仓面面积较大，需要及早覆盖，避免下一层初凝，或为了减小高温影响，防止热量倒灌，以保持较低的浇筑温度时，可采用台阶法浇筑［见图（b）］。平仓振捣是利用手工或机械设备，将混凝土料摊平至规定厚度，并在规定的振捣时间内完成振捣作业。振捣时间应以混凝土不再显著下沉、气泡不再冒出、开始泛浆为准。



混凝土浇筑方法示意图

（a）平铺法浇筑；（b）台阶法浇筑

碾压混凝土浇筑 采用干硬性混凝土，用土石坝的施工设备运输及铺筑，振动碾分层压实，修建建筑物的施工技术。（见碾压混凝土施工）

其他混凝土浇筑 其他特殊混凝土包括水下混凝土、预应力混凝土、预制混凝土、自密实混凝土、堆石混凝土、泵送混凝土、喷射混凝土、真空作业混凝土以及模袋混凝土等，浇筑工艺各有不同。

水下混凝土 将拌制的流态混凝土用工程的手段送入水下预定的部位成型和硬化。（见水下混凝土施工）

预应力混凝土 在现浇混凝土承受主要外部载荷以前，通过张拉预应力筋，对混凝土预先施加压力，使产生预应力。（见预应力混凝土施工）

预制混凝土 当结构条件许可，并且具备吊装设备等条件时，有些混凝土构件可以不就地现浇，而是预先在工厂内或现场附近制作，达到规定强度以后，在现场吊装就位。混凝土构件在预制时，要预先设置吊装用的吊环，对吊点位置、吊装应力、刚度及变形等，都要经过设计计算。

自密实混凝土 浇筑时依靠混凝土自重流动，无须振捣而达到密实。（见自密实混凝土施工）

堆石混凝土 将粗骨料预先填入需要浇筑的部位，然后从堆石体的表面浇筑无须振捣的专用自密实混凝土，使形成混凝土。（见堆石混凝土施工）

泵送混凝土 用混凝土泵或混凝土泵车，将混凝土通过输送管压送到浇筑仓内。

喷射混凝土 以压缩空气为动力，用混凝土喷射机将粗细骨料、胶凝材料、水和外加剂及其他特殊材料（如纤维）等组成的混合料或拌合物，喷向岩石表面或建筑物表面，并与其紧密黏结在一起凝结形成混凝土。（见锚喷）

真空作业混凝土 在混凝土浇筑、振捣、抹平后，用专

门的真空脱水设备和真空模板或真空吸盘，在混凝土面上进行真空作业。

模袋混凝土　用泵送混凝土施工工艺将混凝土（或水泥砂浆）灌入以高强化纤材料预制成的袋状物，形成混凝土。

hunningtu jiaozhu jixie

混凝土浇筑机械　(concrete placing machinery)

完成混凝土运输、入仓、振捣等工作的施工设备。包括供料混凝土运输机械、混凝土浇筑入仓机械、混凝土平仓振捣机械。

混凝土供料运输机械　从混凝土拌和厂向浇筑地点运送混凝土的机械，常用的有自卸汽车、混凝土搅拌车、铁路机车、胶带输送机及混凝土料罐车等。

自卸汽车　水电工程中常用的是10～15t自卸汽车（见运输机械），具有机动、灵活的特点，应用广泛。

混凝土搅拌车　在载重汽车的底盘上加装一台锥形拌和机，可在运输混凝土的途中进行低速搅拌，以防止产生分离。水电工程常用的有$3m^3$和$6m^3$两种。罐内也可先装入混凝土干配料，待运至浇筑地点前15～20min时再起动搅拌机，并加水拌制。

铁路机车　用列车运送装有混凝土的立式吊罐。铁路有标准轨和窄轨两种。牵引机车一般采用柴油机车。常在工程量比较集中，并有合适地形条件时适用。

胶带输送机　能连续生产，并可直接入仓。在混凝土量集中、运输距离较短的情况下适用。为避免混凝土在运输过程中产生分离等现象，宜采用混凝土专用的胶带输送机，见图1。



图1　胶带输送机

混凝土料罐车　用与吊罐配套使用的专用车辆运送混凝土，多为侧卸式。在采用起重机吊运混凝土罐浇筑大体积混凝土时，使用混凝土料罐车向吊罐供料，可以节省起重机与吊罐间的摘、挂钩时间，既节省人力，又可提高混凝土浇筑强度。混凝土料罐车有无轨式和有轨式两种，均采用内燃发动机，全液压操作，其容积有3、6、9、$12m^3$等多种。长江三峡水利枢纽选用的混凝土料罐车的料罐额定容积达$12m^3$。

混凝土浇筑入仓机械　大体积水工混凝土浇筑广泛采用缆索式起重机、门座式起重机、塔式起重机或履带式起重机，也有采用混凝土泵压送混凝土入仓的。对于大型工程，也可采用胎带机或塔带机将混凝土直接运送入仓。在碾压混凝土施工中，还采用自卸汽车直接入仓。

缆索式起重机　简称缆机，是利用在两端支架间的柔性承载索上行走的起重小车吊运混凝土的起重机械。主要有固定式、平移式和辐射式3种。缆机两端的支架分为无塔架式、低塔架式和高塔架式，一般根据两岸的地形条件选用。混凝土坝施工中，缆索式起重机的常用跨距在300～1000m之间，吊钩扬程一般为120～180m，常用的起重量为10～30t。

（1）固定式缆机。两端支架均固定。作业覆盖范围为一条直线，适用于吊运范围小和工程量不大的工程，有时也用于吊运器材、安装设备、转运材料等辅助作业。支架下端固定铰接，上端可垂直承载索摆动的缆机，称为摆塔式缆索起重机。其作业覆盖面比固定式稍有扩大，一端摆动的为单摆塔式，其覆盖面为狭长的梯形；两端摆动的为双摆塔式，其覆盖面为狭长的矩形。中国长江三峡水利枢纽选用德国克虏伯（KRUPP）公司生产的20t摆塔式缆机，跨度1416.12m，最大起升高度215m，塔架高度125m，最大摆动幅度±25m。

（2）平移式缆机。两端支架均带有运行机构，可在河道两岸铺设的轨道上同步移动。这种缆机的作业覆盖面为矩形，作业控制范围大，在大坝混凝土施工中应用较广泛。

（3）辐射式缆机。两端支架中，一端固定不动，而另一端支架在轨道上可围绕固定支架作圆弧移动。这种缆机的作业覆盖范围为扇形面，其控制范围虽小于平移式缆机，但由于其基础土建工程量小，因此在混凝土拱坝的施工中有较多的应用。

门座式起重机　简称门机。它由能沿轨道行走的刚性门座和全回转起重臂组成，门座下面可通行运输车辆。门机按起重臂架的形式分为直臂式和组合式（即象鼻式）两种。常用门机的额定起重量为10～60t，起重臂幅度为16～62m，可根据施工需要选用。

塔式起重机　简称塔机。它由能沿轨道行走的塔形钢架和全回转起重臂组成。塔形钢架又分为转柱式和定柱式两种。起重臂安装在塔形钢架的上部，有效工作范围较大。大型塔式起重机，在塔形钢架下部也可通行混凝土运输车辆。

履带式起重机　属于全回转动臂式起重机，一般由履带式正铲挖掘机变换工作装置，并做局部改装而成，机动性较好。水电工程中常用履带式起重机的起重量为3～60t，工作幅度达到41m。

混凝土泵　利用活塞的往复作用，将混凝土沿管道连续输送到浇筑仓面的一种专用设备。其优点是能同时完成混凝土的水平和垂直运输，在施工场地狭窄的隧洞与地下厂房混凝土施工中广泛采用；缺点是只能泵送较细骨料（粒径不超过40～50mm）和坍落度较大、水泥用量较多的混凝土，不适于大体积混凝土浇筑。混凝土泵的水平输送距离一般可达300～500m，垂直输送高度达70m以上。在混凝土泵的基础上发展起来的输送泵车，是将混凝土泵装在汽车底盘上，并用液压折叠式臂架管道来运送混凝土，比混凝土泵具有更好的机动性。

塔带机　在固定或轨式移动塔式起重机上加设一套悬吊胶带输送系统而成，见图2。该设备覆盖范围大，机动灵

活，混凝土入仓能力强，宜在工程量较大且浇筑强度较高的大型工程中采用。中国长江三峡水利枢纽选用的美国洛泰克(ROTEC)公司生产的塔带机，其悬吊胶带由内外布料机组成，长度分别为 49.27m 和 47.69m，能任意进行平面 360°转动、±30°仰俯及整体上下移动，可同时完成混凝土入仓及摊铺作业。最大布料半径 100.79m。混凝土入仓能力与骨料粒径、坍落度及布料机倾角有关，一般为 $400m^3/h$。通常采用胶带机或自卸汽车供料。



图 2　塔带机

胎带机　在轮胎式起重机底盘上设可伸缩的摇臂胶带系统而成。该设备现场适应能力强，机动灵活，适合工程初期及较低部位混凝土浇筑，通常采用胶带输送机或自卸汽车供料。中国长江三峡水利枢纽选用的美国洛泰克公司生产的胎带机，最大布料半径 61m，能任意进行平面 360°转动、30°上仰及 15°下俯，可同时完成混凝土入仓及摊铺作业，最大浇筑高度 33m，水平位置时混凝土入仓能力达到 $456m^3/h$。

混凝土平仓振捣机械　常规混凝土施工常用混凝土振捣器、平仓振捣机等设备。碾压混凝土则需用推土机或平仓机摊铺混凝土，用振动碾碾压。

混凝土振捣器　一种借助动力通过高速回转的偏心装置产生频繁振动，并将这种频繁的振动传给混凝土，使混凝土得到振动密实的机械。振动的传递方式有插入式、附着式和平板式等多种，其中插入式振捣器使用最广泛。

平仓振捣机　适用于大仓面低坍落度混凝土的浇筑。其振捣效率比手持式振捣器高 10 倍以上，而且可减轻工人的劳动强度。实用的机型有两种：一种是采用小型低比压液压挖掘机进行改装，在臂端挂装液压振捣器组，依靠强烈的振捣作用，在将混凝土振实的同时进行振平。由于其机身可以回转，因此作业覆盖面大，生产效率高，可减少机器在仓内的走动。另一种是在小型低比压推土机的后端加设可挂装液压振捣器组，其优点是可在仓内短距离推运混凝土，对吊罐卸料的定位要求不高；缺点是走行比较频繁，另外，这种机械的推土刀性能不同于一般推土机，它应保证混凝土在推运过程中不致因发生翻动而产生分离。

振动碾　靠自重振动作用压实土、砂、堆石或混凝土的施工设备。碾压混凝土施工采用振动碾振动压实。常用的振动碾有轮胎驱动式、双滚筒自行式、双联式及小型振动碾等多种，其中以双滚筒自行式最为常见。较常用的振动碾自重为 5～18t，振频为 40～50Hz，振幅为 0.8mm 左右，碾压速度为 1～2km/h。小型振动碾大多为手扶式双滚筒振动碾，质量较小，主要用于靠近模板、场地边角和基岩等处的压实。

hunningtu mianban duishiba

混凝土面板堆石坝

(concrete faced rockfill dam, CFRD)　用堆石料或(和)砂砾石料分层碾压填筑，上游面用钢筋混凝土面板作防渗体的土石坝。与其他土石坝相比，这类坝具有坝体断面小、工程量省和枢纽布置紧凑、施工导流和度汛措施简便、施工不受或少受气候影响、各工序间相互干扰较少、运行维护比较方便等优点。

坝体分区　硬岩(饱和抗压强度大于 30MPa)堆石料修建的坝的断面布置如图 1 所示。根据对坝料的强度、渗透性、压缩性、施工方便和经济合理等要求进行分区，从上游向下游依次分为垫层区、过渡层区、上游堆石区及下游堆石区。对于高坝，死水位以下的面板上游设置辅助防渗铺盖，并在铺盖上设置任意料盖重。堆石坝体上游部分应具有低压缩性，坝体上游至下游应满足模量递减、渗透性递增的原则。各区坝料的透水性按水力过渡和反滤原则要求设计。垫层料由加工过的小石或经筛选的天然砂砾石组成，要求有良好的级配，最大粒径 80～100mm，小于 5mm 的颗粒含量为 35%～55%，小于 0.075mm 的颗粒含量为 4%～8%，渗透系数为 $1\times10^{-4}\sim1\times10^{-3}$ cm/s，在水平和斜坡振动碾压实后，起整平坡面和支承面板的作用。过渡层料可采用洞室开挖石料或专门开采的细堆石料、经筛分加工的天然砂砾石料，最大粒径宜为 30cm。过渡料对垫层料具有反滤保护作用，在垫层和上游堆石间的渗流和变形方面起过渡作用。上游堆石区的上游部分为主要持力体，要认真选料和碾压密实，一般要求最大粒径不超过层厚，压实后小于 5mm 的颗粒含量不宜超过 20%，小于 0.075mm 的颗粒含量不宜超过 5%。中低坝下游堆石区的变形对面板影响较小，可适当降低要求。下游堆石区水位以上的干燥区坝料也可用压实后变形特性与上游堆石区的变形特性相适应的软岩堆石料。超径大石可用起重机或推土机运至下游坡面码放，起到护坡的作用。

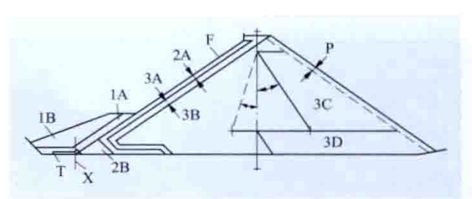


图 1　岩基上混凝土面板堆石坝体分区示意图
1A—上游铺盖区；1B—盖重区；2A—垫层区；2B—特殊垫层区；3A—过渡区；3B—上游堆石区；3C—下游堆石区；3D—排水区；P—块石护坡；F—面板；T—趾板；X—趾板基准线

随着经验的积累，筑坝材料已可使用压实砂砾石料、饱和抗压强度小于 30MPa 的软岩堆石料、特硬岩堆石料等，这时断面分区要做相应调整。采用砂砾石填筑的坝体，需采用渗流控制措施，要增设可靠的竖向和水平向排水区。下游设置护坡或用堆石料扩充下游堆石区。

面板和趾板　混凝土面板顶部厚 0.3～0.4m，向底部逐步增加，配置单层或双层双向钢筋，配筋率为 0.3%～0.4%。在高坝压性垂直缝、周边缝及邻近周边缝的垂直缝两侧宜配置抗挤压的构造筋。面板混凝土要求有良好的施工和易性，足够的强度、抗裂、抗渗和抗冻耐久性，要求采用

低水灰比，掺加引气剂、高效减水剂及15%～30%不低于Ⅱ级的粉煤灰。强度等级不低于C25，抗渗等级不低于W8。趾板浇筑在坝上游坡脚的基岩面上，是面板与地基的连接部件，主要起防渗作用。趾板形式一般为平趾板，当受地形、地质条件限制时，也可采用连接板或回填混凝土等措施，局部可采用L形趾板、高趾墙代替。趾板宽度视地基情况按允许水力坡降和地基处理措施确定，最小为3m；趾板厚度可以小于与之相连接的面板厚度，但不小于0.3m。趾板下设铺盖式固结灌浆和帷幕灌浆。以往要求趾板建于坚硬、可灌浆、不冲蚀的岩基上，实践中已有置于风化基岩、砂砾石覆盖层上的经验。

接缝和止水　面板和趾板间的接缝称周边缝，按受力条件属张拉缝，承受三向变形。面板接缝止水是大坝防渗系统的重要组成部分，也是相对薄弱的环节，因此需严格做好止水结构。原有经验是用底部铜片及中间塑胶片两道止水，缝顶用塑性止水材料封闭，在接缝张开时可在水压力下挤入缝中，保持接缝的止水作用。由于中间止水带施工质量较难保证，中低混凝土面板坝趋于取消中间止水而加强表面止水，高坝必要时可设置中间止水。已开发出能够在水压力作用下渗入接缝、发挥止水作用的SR和GB等系列止水材料。有些高坝在表面嵌缝材料底部增加设置波形止水带，或在趾板中部设置橡胶棒，以提高止水效果。在周边缝下常设一反滤料的小区，缝顶以粉煤灰、粉细砂等松散材料覆盖，漏水时可截留渗透水中的细颗粒，使缝淤塞而自愈。为适应面板混凝土滑模施工和面板变形，两坝肩附近的面板内设张性垂直缝，其余部分的面板内设压性垂直缝，垂直缝间距为12～18m。张性垂直缝的止水结构与周边缝相同，压性垂直缝的止水结构可以适当简化。因面板分期浇筑等原因形成的水平缝，可按施工缝处理。

施工　除一般土石方和混凝土施工机具外，还开发了一系列专用机具和工艺，以提高施工质量和速度，如浇筑面板混凝土的无轨滑模、垫层上游坡面施工期碾压砂浆保护层、压实堆石料的重型碾压机具（25t自行式、22t牵引式重型振动碾和冲击压实碾）、压实边角部位的液压平板振动器、铜止水片的现场成型，以及十字和T字接头的工厂模压成型加工技术、趾板施工整体滑模等，如图2所示。通过工程实践积累了施工技术和经验：堆石加水碾压提高压实密度；垫层料采用喷乳化沥青、喷混凝土、碾压砂浆、挤压边墙（表面喷乳化沥青或必要时对垂直缝下挤压边墙凿缝，以进一步减轻对面板的影响）、翻模砂浆固坡等形式



图2　混凝土面板堆石坝施工

的保护措施；高坝面板混凝土采用分期浇筑，为避免分期面板顶部脱空，堆石体的填筑需10～20m的超高；为避免结构性裂缝，中国修建的高面板坝采取了面板浇筑时保证其下部的堆石有4～6个月的沉降时间，同时堆石体的月沉降率小于5mm等预沉降措施；除采用高效减水剂、引气剂、减缩剂外，面板混凝土还采取掺加聚丙烯或聚丙烯腈纤维，添加粉煤灰、氧化镁等改性措施；面板堆石坝趾板地基常为坝基最低的部位，初期施工中曾发生反向渗水压坏面板或损坏垫层的问题，因此施工中比较重视堆石体反向排水的设置。

简史　20世纪30年代以前为面板堆石坝的早期阶段，施工方法主要以厚层抛填为主，有的工程辅以高压水冲实，也有的采用干砌法。坝高超过75m的坝大多产生表面裂缝和渗漏。30～60年代后期为过渡阶段，因坝体变形较大，渗漏较严重，需大量修补，人们对面板堆石坝的安全有所疑虑，其建设处于相对停滞状态。自60年代大型土石方施工机械，特别是重型振动碾的出现，使堆石坝分层碾压密实变成现实，同时也使采用质量较差的堆石料，甚至软岩筑坝成为可能。将传统的厚层抛填堆石变成薄层碾压堆石后，堆石体密实而变形减小，提高了安全性，面板堆石坝得到了迅速发展。现代面板堆石坝的设计理念和施工技术在1971年建成的澳大利亚的塞沙那（Cethana）坝（高110m）上初步形成，随后在巴西的福斯-杜阿雷亚（Foz do Areia）、萨尔瓦集那（Salvajina）等坝上趋于成熟。墨西哥1993年建成高187m的阿瓜米尔帕（Aguamilpa）坝，中国2000年建成的高178m的天生桥一级坝为该阶段的代表性工程。进入21世纪，200m级高面板堆石坝日益增多，建成了中国的洪家渡、三板溪和水布垭，巴西的巴拉格兰德（Barra Grande）和坎普斯诺沃斯（Campos Novos），冰岛的卡拉纽卡（Karahnjukar），马来西亚的巴贡（Bakun）等一大批高坝。其中，2008年建成的水布垭坝高达233m，为国际同类型坝中最高的坝。趾板建在深厚覆盖层上的面板堆石坝技术也有较大发展，坝高突破100m，其中九甸峡坝高达136.5m。

参考书目

周建平，宗敦峰，杨继学，等．现代堆石坝技术进展——2009．北京：中国水利水电出版社，2009．

曹克明，汪易森，徐建军，等．混凝土面板堆石坝．北京：中国水利水电出版社，2008．

hunningtu peihebi

混凝土配合比 (mix proportion of concrete)

混凝土中各组成材料的质量比例，工程中通常以单位体积混凝土中各组成材料的质量表示。在混凝土的组成材料中，砂石骨料的质量比例一般是最大的，其次是胶凝材料（水泥和掺合料）、水、外加剂。确定混凝土配合比前，通常根据混凝土物理力学性能要求进行配合比设计，通过试验确定配合比参数，提出经济合理的混凝土配合比。

配合比设计　确定混凝土各组成材料数量关系的工作。配合比设计应满足：①结构设计的混凝土强度等级要求；②混凝土施工所需的和易性；③工程所处环境对混凝土耐久性的要求；④经济性要求，节约水泥，降低混凝土成本。

混凝土配合比设计首先按照原材料的性能及混凝土的技

术要求进行计算，得出理论配合比；经过试验室试拌、制样、性能检测、调整，提出满足各项性能要求的试验室配合比；最后按试验室配合比，通过现场试生产、调整，确定施工配合比。

配合比基本参数 混凝土配合比基本参数包括水胶比、单位用水量、骨料级配及砂率、外加剂及掺合料掺量。

水胶比 单位体积内水与水泥（或胶凝材料）的质量比，是决定混凝土强度和耐久性的主要因素。混凝土强度与水胶比一般呈反比关系，水胶比越小，混凝土强度越高。DL/T 5144—2001《水工混凝土施工规范》中规定的水工建筑物各部位常态混凝土水胶比的最大允许值见表。在碾压混凝土中，水胶比一般小于0.65。

水工建筑物各部位常态混凝土水胶比的最大允许值

混凝土所在部位	严寒地区	寒冷地区	温和地区
上、下游水位以上（坝体外部）	0.50	0.55	0.60
上、下游水位变化区（坝体外部）	0.45	0.50	0.55
上、下游最低水位以下（坝体外部）	0.50	0.55	0.60
基础	0.50	0.55	0.60
内部	0.60	0.65	0.65
受水流冲刷部位	0.45	0.50	0.50

单位用水量 混凝土骨料在饱和面干状态下每立方米混凝土中所需水的质量，根据骨料种类与规格、掺合料和外加剂等确定。在实际生产过程中，骨料表面的含水量和外加剂溶液中的水量，都要计入混凝土用水量中。

骨料级配及砂率 骨料级配是组成骨料的不同粒径颗粒的比例关系，宜选择空隙率较小的级配。砂率是骨料中的砂与骨料总量的质量比，一般在25%～40%之间；采用人工粗骨料时，砂率较天然粗骨料要增加2%～6%。

外加剂及掺合料掺量 均按其占胶凝材料质量的百分比计，是配制有特殊要求混凝土配合比的主要参数。例如，在抗冻混凝土中掺加减水剂和引气剂，通过控制混凝土含气量提高抗冻性能；在高强混凝土配合比中掺加高效减水剂和矿物掺合料，提高混凝土强度。外加剂的掺量按供货单位推荐掺量、使用要求、施工条件、混凝土原材料等因素通过试验确定。减水剂是常用的外加剂，掺量一般为0.5%～1.0%。掺合料掺量也通过试验确定。粉煤灰是常用的掺合料，常态混凝土中粉煤灰的掺量一般为15%～30%，在碾压混凝土中最大掺量可达50%～65%。

对某些特殊工艺要求的混凝土配合比，还进行了特殊规定，如大体积内部混凝土的胶凝材料用量不宜低于140kg/m³，大坝碾压混凝土中胶凝材料的总量不宜低于130kg/m³，泵送混凝土中胶凝材料的总量不宜低于300kg/m³等。

hunningtu wendu kongzhi

混凝土温度控制 (temperature control of concrete)

为防止混凝土由于水化热和外界温度影响产生裂缝而采取的工程措施。混凝土的硬化过程是水泥发生水化作用的过程，水泥水化伴随发热的化学反应使混凝土温度升高。混凝土是不良导热体，热导率很小，大体积混凝土内部温度升高，散热很慢，内外温差和温度梯度过大，引起胀缩不均，产生温度应力。当温度应力超过混凝土的抗裂能力时，混凝土将产生裂缝。混凝土浇筑初期，外界温度骤降，也将产生表面裂缝。刚性地基上的混凝土，在降温过程中，由于基础的约束，同时混凝土弹性模量逐渐增大，也会产生拉应力而导致开裂，产生深层裂缝或贯穿性裂缝，这两类裂缝都要尽量避免。表面裂缝在一定条件下也会发展成深层裂缝，以至贯穿性裂缝，尤其是发生在大坝上游面和基础部位的表面裂缝，要尽量避免。为防止产生这些裂缝，一方面要提高混凝土的抗裂能力，主要是提高混凝土的极限拉伸值，相应提高其抗压、抗拉强度和施工质量的均匀性；另一方面要采取温控措施，减小温度应力。对于高、中坝，应进行防裂及温度控制设计，提出防裂措施及温度控制标准。大型工程还应采用有限元进行温度场、温度应力分析。

温度控制标准 混凝土温度控制一般以温度差值作为控制标准，包括基础温差、上下层温差、内外温差。

（1）基础温差。混凝土浇筑块在其基础约束区范围内混凝土最高温度与稳定温度或准稳定温度之差。由于基础温差而产生的应变或应力，随约束条件而不同，离基础面越近，浇筑块体越长，受约束越大，允许温差越小。基础约束区分基础强约束区和基础弱约束区，基础强约束区受约束最大，因此允许温差较小。基础温差一般主要考虑建筑物尺寸、混凝土力学性能、基岩弹性模量与混凝土弹性模量的比值、混凝土浇筑上升情况等因素确定。对于重要部位，应核算基础约束区内混凝土温度应力，不能满足防裂要求时，考虑采用温度控制措施以及减小浇筑块的分缝分块尺寸。同强度等级的碾压混凝土与常态混凝土在相同约束条件下，因为碾压混凝土的抗拉能力弱于常态混凝土，其允许温差一般要严格一些。

（2）上下层温差。在老混凝土面（龄期超过28天）上、下层各$L/4$（L为混凝土浇筑块长边尺寸）范围内上层混凝土最高平均温度与新混凝土开始浇筑时下层实际平均温度之差。短间歇连续浇筑，或上层混凝土高度大于$0.5L$时，上下层温差允许值为15～20℃。

（3）内外温差。浇筑块的平均温度与其表面温度之差。一般控制在25℃以内，应通过温度应力计算分析确定。为降低坝体内外温差，防止或减少表面裂缝，应在低温季节前，将坝体温度降至设计要求的温度，并在低温季节采用表面保温。

温度控制措施 主要是从减少混凝土发热量、降低浇筑温度、加强浇筑块散热、通水冷却和表面保护等方面采取措施，控制温差。

（1）减少混凝土发热量。在满足设计要求的情况下，尽量减少水泥水化热。主要措施有：①采用水化热低或氧化镁含量较高的水泥；②尽量减少水泥用量，加入粉煤灰等掺合料和外加剂；③调整骨料级配，提高粗骨料最大粒径；④采用小坍落度的低流态混凝土；⑤如为混凝土坝，坝体分区采用不同强度等级的混凝土，并利用混凝土的后期强度；⑥有条件的工程，采用碾压混凝土。

（2）降低浇筑温度。浇筑温度是指混凝土经过平仓振捣后，覆盖上层混凝土前，在距混凝土面10cm深处的温度。降低浇筑温度的主要措施有：①充分利用气温较低的季节或

时段浇筑混凝土；②用冷水或加冰拌和混凝土；③采取骨料堆高、地垅取料、搭盖凉棚、洒水喷雾等措施降低骨料温度，必要时再采取预冷粗骨料的措施，并采取措施减少热量倒灌；④隔热降温，防止热量倒灌使混凝土温度回升；⑤缩短混凝土运输及暴露时间，加快覆盖速度，平仓振捣后及时采用隔热材料覆盖；⑥浇筑块尺寸较大时，可采用台阶法浇筑，浇筑块分层厚度小于 1.5m。

(3) 加强浇筑块的散热。混凝土浇筑后，随水化作用的进行，混凝土继续升温，需采取措施加速散热。主要措施有：①分缝分块浇筑时分块尺寸适当；②采用薄层浇筑，利用表面自然散热，并合理选择间歇时间，层间间歇最好控制在 3～7 天；③采取结构措施，如设置宽缝，增加散热面；④表面流水养护以及仓面喷雾措施，仓面喷雾可降低仓面环境温度，加快混凝土块在浇筑过程中的散热。

(4) 通水冷却。常采用坝体通水冷却方式降低坝体温度。通水冷却时，控制水温和通水时间，通水水温与混凝土内部温度之差不宜超过 20℃，日降温不超过 1℃。对高拱坝，常采用一期冷却、中期冷却、二期冷却的分期冷却方式，一期冷却控制混凝土最高温度，中期冷却控制混凝土温度回弹并适当降温，二期冷却将坝体混凝土温度降至灌浆温度。

(5) 表面保护。在气温骤降频繁的季节，对坝面、层面、侧面及时进行保温和保湿养护，孔口、廊道等通风部位及时保温封堵。寒冷地区尤应重视冬季的表面保温。表面保护应通过保温设计，选定保温材料，确定保温时间。保温材料根据工地具体情况，采用草帘子、珍珠岩、纤维板、聚乙烯、聚苯乙烯或其他保温材料。必要时可采用推迟拆模时间或在模板内衬保温材料等办法。有条件时也可考虑采用预制混凝土模板。

(6) 采用氧化镁延迟性微膨胀混凝土技术。这是利用氧化镁在水泥水化过程中的变形特性，使混凝土产生延迟性微膨胀体积变形，在特定约束条件下，产生预压应力，补偿大体积混凝土降温收缩的拉应力，防止产生裂缝的技术。技术要求比较严格，必须进行温度应力补偿设计，以及混凝土材料性能和变形规律的研究。氧化镁混凝土的制备方式有采用高含量氧化镁水泥和在拌合物中外掺氧化镁两种。

(7) 日平均气温连续 5 天稳定在 5℃以下或最低气温连续 5 天稳定在 −3℃以下时，按低温季节施工。在低温季节进行混凝土施工时，必须采取有效措施，以防止混凝土在凝结硬化初期遭受冻害，造成混凝土强度、耐久性的损失。工程中采取的方法主要是加热原材料，对拌和、运输和浇筑过程中的混凝土保温，对浇筑的混凝土进行蓄热或加热保温养护，以及在混凝土中掺入一定量的外加剂，提高混凝土的早期强度或抗冻能力等。

hunningtu yanghu

混凝土养护 (curing of concrete) 已密实成型的混凝土在一定时间内保持适当的温度和湿度，促使其硬化，达到所需的强度及耐久性等指标的工艺措施。混凝土中的水泥与水混合后立即发生化学反应，称为水化反应。由于水化反应的作用，混凝土拌合物逐渐由半流体状态变为固体状态，这一过程为凝结期。凝结期以后，进入硬化期，水泥的水化反应继续进行。混凝土的硬化过程除与水泥的矿物组成和颗粒粗细有关外，温度和湿度是水泥硬化的必要条件。温度和湿度越高，水化速度越快，凝结硬化也越快。混凝土的强度则随着硬化的龄期而增大。因此，温度、湿度及养护延续的时间是混凝土养护的 3 个要素。养护的工艺可分为自然养护和热养护两大类。

自然养护　在自然气候条件下，采取浇水润湿、覆盖以及利用太阳辐射能保温等措施养护混凝土。①浇水覆盖法主要用于高温季节或干燥条件下，用草袋覆盖混凝土并洒水或喷雾，使混凝土表面经常保持湿润，对水平面也可以贮水覆盖。采用此法时，需在混凝土浇筑完毕 12～18h 内即开始养护，在炎热干燥条件下还要提前进行。养护延续时间视水泥品种而定，一般不少于 14～21 天，必要时还要延长。②太阳辐射能保温养护主要用于低温季节，有直接覆盖式、罩式和窑式几种，利用太阳辐射能提高养护温度，可缩短养护时间，节省养护费用。直接覆盖式是将塑料薄膜覆盖于混凝土表面，适用于大面积现浇混凝土和大型或非标准构件。罩式是采用透明塑料薄膜或玻璃钢太阳能养护罩，适用于生产定型构件的中小型构件厂。窑式是采用太阳能养护窑，是一种能连续不间断地进行混凝土构件养护的水平隧道窑。自然养护简便易行，但养护延续时间较长。在工地现浇的混凝土，特别是大体积混凝土，一般均采用自然养护法。

热养护　利用外界热源加热混凝土以加速水泥水化反应的养护工艺。热养护可分为湿热养护和干热养护。①湿热养护是采用蒸汽加热混凝土，又可分为常压蒸汽养护和高压蒸汽养护。常压蒸汽养护的温度一般不超过 95℃，可采用各式养护坑或养护窑，经过预养、升温、恒温、降温几个阶段，养护周期为数小时至十余小时。还有的采用热炕台面养护和热拌热模等养护工艺。高压蒸汽养护采用高压蒸汽釜，在高温（200℃左右）、高压（10～20 个大气压）条件下，经过 10～14h，即可达到 1～3 个月标准养护下的强度。②干热养护是混凝土不与热介质接触，或用低湿介质直接加热的养护工艺。全干热养护时，混凝土始终在高温低湿环境中干烘，热源除可采用蒸汽外，还可采用煤气、电，如红外线养护、热风养护、电热养护等，养护周期短，但混凝土失水过多，会降低后期强度。为避免混凝土失水过多，有的混凝土构件先采用干热养护，待混凝土具有一定结构强度时再采用湿热养护。

在试验室中，为测试混凝土各项性能所制作的试件，须按照规定的养护方法进行养护，称为标准养护。DL/T 5150—2001《水工混凝土试验规程》规定，标准养护室温度应控制在 (20±3)℃，相对湿度则控制在 95%以上。

hunningtu yunshu

混凝土运输 (transportation of concrete) 将混凝土拌合物在允许的时间内从拌和地点运送到浇筑仓面的工序。混凝土运输能力应与混凝土拌和、浇筑强度要求相适应，运输能力由工作循环时间和所装载的混凝土量确定。运输过程中应保持混凝土的均匀性及和易性，缩短运输时间和倒运次数。混凝土的自由下落高度不宜大于 1.5m，超过时要采取缓降措施。运输工具必要时应设有遮盖和保温设施。混凝土运输方式分水平运输、垂直运输和混合运输 3 种，结合施工现场的地形、地质条件，施工布置，水文特点，导流方式，浇筑部位的体型结构，浇筑强度等要求确定。

水平运输　主要为解决两点之间水平距离的运输。水平运输分无轨运输、有轨运输等方式。无轨运输能和大多数起吊设备和其他入仓设备配套使用，运输道路容易布置，但存在运输成本高、能源消耗大的特点。运输设备主要有混凝土自卸汽车、专用混凝土运输车、汽车载运混凝土立罐等。混凝土自卸汽车通常将自卸汽车加深斗容、加装遮阳防晒装置、加装卸料装置后运输混凝土。专用混凝土运输车有混凝土搅拌运输车和轮胎自行式混凝土运输车。汽车载运混凝土立罐是将吨位较大的载重汽车后车架上加装载重平台，放置混凝土立罐。有轨运输可使用标准轨距或窄轨铁路，用机车牵引装有混凝土罐的平台车或采用有轨混凝土侧卸车将混凝土从拌和系统运送到吊运点。有轨运输一般采用机车拖平板车立罐或机车拖侧卸罐将混凝土从拌和系统运送到吊运点。有轨运输的运输能力强，对混凝土和易性的影响小，需设置专用运输线路，线路的转弯半径和坡度要求较高，线路系统建设周期也较长。机车应用最广的是内燃机车，其他常用的还有蒸汽机车、电动机车、内燃-电动机车。线路标准分为准轨和窄轨。窄轨铁路转弯半径和线路间距小、材料消耗低、混凝土运量小。大型工程一般使用准轨铁路。

垂直运输　主要为解决两点之间高程差的运输。垂直运输主要采用缆机、门塔式起重机、履带式起重机、轮胎式起重机、混凝土泵、溜管、溜槽等形式。采用门塔式起重机浇筑混凝土坝时，常需配以栈桥。采用缆机吊运混凝土时，不需栈桥，可由汽车或机车牵引混凝土罐车直接运到缆机下面，由缆机将混凝土罐吊运入仓。缆机类型主要分为固定式、辐射式、平移式和摆塔式。门塔式起重机类型分为门式、高架门式、塔式。

混合运输　将混凝土直接输送入仓，可同时解决水平运输和垂直运输。主要采用胶带机混合运输设备和混凝土泵。胶带机混合运输分胶带输送机、仓面布料机、胎带机和塔带机。塔带机的基本形式是由一台固定塔式起重机和供料的带式输送机以及悬吊在塔式起重机臂架上的输送机组成，借塔式起重机旋转、大车的行走和悬吊带式输送机绕支铰在平面上的转动，不断移动卸料点的位置，实现仓面浅层布料，使混凝土浇筑强度大大提高。采用带式输送机运送混凝土时，宜用专用于输送混凝土的槽形带式输送机。混凝土泵有拖移式混凝土泵机和自行式混凝土泵车。

hunningtu zhibei

混凝土制备　(preparation of concrete)

按照确定的混凝土配合比，使用拌和设备将骨料、水泥、掺合料、水及外加剂拌制成混凝土拌合物的工艺过程。混凝土制备主要包括混凝土配料及混凝土拌和等主要环节和工序。

混凝土配料　混凝土拌制过程中，按确定的混凝土配合比将混凝土的各项原材料分别称量配好，以备投料拌和的工序。为了使制成的混凝土能满足设计要求的强度、耐久性和施工要求的和易性，需通过设计和试验，提出经济合理的混凝土配合比。骨料中的含水量和外加剂溶液中的水量，都要计入混凝土用水量。在混凝土拌和过程中，需根据气候条件，经常测定骨料的含水量，以便调整拌和混凝土时的加水量。

混凝土拌和　将经过配料的混凝土骨料、水泥、掺合料、水及外加剂等通过拌和设备，按一定投料方式和拌和时间搅拌均匀，制成混凝土拌合物的工序。

拌和设备　通常使用搅拌机。搅拌机的型式很多，常用的可分自落式与强制式两类。自落式搅拌机工作时，拌和筒绕其水平轴线回转，加入拌筒内的物料，被叶片提升至一定高度后，借自重下落，这样周而复始的运动，达到均匀搅拌的效果。强制式搅拌机的拌和筒固定不动，由筒内转轴上的叶片旋转进行搅拌，依靠剪力作用，强迫各组分物料沿滑移面产生相互滑动，达到均匀混合。自落式搅拌机又分鼓筒形、双锥形等，适用于拌和塑性混凝土和低流态混凝土。强制式搅拌机适于拌和干硬性混凝土。

投料方式　混凝土拌和时，通常各物料的投入顺序仍有先后。例如，采用自落式搅拌机时，为减少粉尘，可先加入10%的水，然后加入骨料、水泥、掺合料和水。对强制式搅拌机，则在投入干物料的同时，缓慢均匀加入全部水量。

拌和时间　混凝土拌和时间包括投料时间、搅拌时间和出料时间。搅拌时间为从全部物料投入搅拌筒搅拌时起，到混凝土拌合物开始出料为止所经历的时间。搅拌时间与搅拌机的性能和容量、最大骨料粒径及要求的混凝土和易性有关，如加入掺合料、外加剂或加冰时，要适当延长拌和时间。

hunningtu zhiliang kongzhi

混凝土质量控制　(quality control of concrete)

为保证混凝土工程达到设计要求的质量，在施工中对混凝土质量进行的检验、监督、控制等管理工作。混凝土质量控制工作贯穿于施工全过程，对混凝土的原材料、施工前的准备、施工的各道工序以及硬化后的混凝土，都要进行检查和检验。为控制混凝土的质量，混凝土的配合比须通过试验选定，并在施工中检查。此外，还要确定混凝土质量评定的标准和方法，建立质量管理体系，包括监督和检验体系，积极创造条件实行全面质量管理。

质量控制的主要内容　包括原材料的检验，混凝土配合比的检查，浇筑仓面及准备工作的检查，施工过程中各工序的检查和取样检验，拆模、硬化后混凝土质量的检查。

(1) 原材料的检验。主要检验项目有：①水泥制造厂的品质试验报告和出厂合格证，必要时应进行复验。检验水泥的强度、凝结时间、体积安定性，必要时还增加稠度、细度、比重和水化热试验。②拌和及养护混凝土用水的水质。③砂石等混凝土骨料的含泥量、有机质含量、碱活性成分含量、砂子和小石的表面含水率、砂子的细度模数、各级粗骨料的超逊径含量、针片状含量及有无活性骨料、黄锈等。④掺合料出厂时的产品合格证，主要包括厂名、等级、出厂日期、批号和品质检验结果。⑤外加剂的质量、掺量及配制的溶液浓度。

(2) 混凝土配合比的检查。为保证混凝土的质量，工程所用混凝土的配合比须通过试验确定，并在施工中进行检查。配合比的检查主要包括：①在混凝土拌和配料地点检查各种原材料的配合量，每班不少于2次，衡器要随时校正。②水泥、砂、石、掺合料均需以质量计，水及外加剂溶液可按质量折算成体积，称量的偏差需在允许范围内。③在混凝土拌和过程中，根据气候条件定时测定砂、石表面含水率，在降雨时增加测定次数，相应调整加水量。

（3）浇筑仓面及准备工作的检查。主要包括：①地基处理须经验收合格，施工工作缝的表面已按要求加工处理。②浇筑仓面的杂物已经清理并冲洗干净，排净积水。③仓面的浇筑平台和平仓、振捣、缓降设备均按施工要求备齐。④钢筋、模板、预埋件及止水设施等均安装固定完毕，符合设计要求。

（4）施工过程中各工序的检查和取样检验。主要包括：①混凝土拌和，原材料的配料单、衡器的准确性、拌和时间、混凝土坍落度、含气量等，按规定随机取样，检验混凝土的强度，必要时也要检验抗渗、抗冻强度等级。②混凝土运输，有无违反规定及发生混凝土拌合物离析、漏浆、严重泌水、温度损失及过多降低坍落度等现象，混凝土在运输、浇筑过程中，不可在中途或仓内加水。③混凝土浇筑，是否按规定厚度、次序、方向分层进行，平仓、振捣、间歇时间等是否符合要求，工作缝处理是否符合规定等。④对于有温度控制要求的混凝土，各项温度控制措施是否符合要求，混凝土浇筑的分段、分缝、分块高度及浇筑间歇时间等是否符合设计规定。⑤对碾压混凝土，是否按规定摊铺、碾压，测定容重和及时切缝填缝等。⑥混凝土浇筑完毕，是否及时按要求抹光修整、进行养护，养护时间是否符合规定。

（5）拆模、硬化后混凝土质量的检查。主要有：①对拆模后混凝土表面进行外观检查，如发现裂缝，需详细记录裂缝的部位、长度、宽度、深度、发现的日期及发展情况。②对混凝土强度或内部质量有怀疑时，一般可用超声波、回弹仪等无损检测法，检查其质量。

混凝土质量的评定　工程施工中，对混凝土质量的评定，是以施工过程取样成型的若干组试件设计龄期抗压强度试验结果来评价的。即使是相同的配合比和工艺条件，各个试件的试验结果也不会完全相同，而有一定的随机变异性。通常，以混凝土强度的平均值、离差系数（或标准差）、混凝土的生产质量控制水平以及混凝土建筑物的钻孔取芯和压水试验成果作为混凝土质量评定的依据。

（1）验收批混凝土强度平均值和最小值应同时满足下列要求才可评为合格，即强度验收实施双控标准为

$$m_{fcu} \geqslant f_{cu,k} + Kt\sigma_0 \tag{1}$$

$$f_{cu,min} \geqslant \begin{cases} 0.85 f_{cu,k} & (\leqslant C_{90}20) \\ 0.90 f_{cu,k} & (> C_{90}20) \end{cases} \tag{2}$$

式中 m_{fcu} 为混凝土强度平均值；$f_{cu,k}$ 为混凝土设计龄期的强度标准值；K 为合格判定系数，根据验收批统计组数 n 值，按表1选取；t 为概率度系数；σ_0 为验收批混凝土强度标准差；$f_{cu,min}$ 为 n 组强度中的最小值。

表1　合格判定系数 *K* 值

n	2	3	4	5	6～10	11～15	16～25	>25
K	0.71	0.58	0.50	0.45	0.36	0.28	0.23	0.20

注：1. 同一验收批混凝土，应由强度标准相同、配合比和生产工艺基本相同的混凝土组成；对现浇混凝土，宜按单位工程的验收项目或按月划分验收批。
2. 验收批混凝土强度标准差 σ_0 计算值小于 $0.06f_{cu,k}$ 时，应取 $\sigma_0 = 0.06f_{cu,k}$。

（2）混凝土生产质量控制水平。混凝土生产质量控制水平以试件28天龄期抗压强度标准差（σ）或离差系数（C_v）作为评价依据。混凝土强度标准差按式（3）计算，离差系数按式（4）计算

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} f_{cu,i}^2 - nm_{f,cu}^2}{n-1}} \tag{3}$$

$$C_v = \frac{\sigma}{m_{f,cu}} \tag{4}$$

式中 $f_{cu,i}$ 为统计周期内第 i 组混凝土试件的强度值；$m_{f,cu}$ 为统计周期内 n 组混凝土试件的强度平均值；n 为统计周期内相同强度标准值的混凝土试件组数。混凝土生产质量水平评定标准见表2。混凝土质量等级（设计龄期）见表3。

表2　混凝土生产质量控制水平

评定指标		优秀	良好	一般	差
抗压强度离差系数（C_v）	28天抗压强度平均值≤20MPa	<0.15	0.15～0.18	0.18～0.22	≥0.22
	28天抗压强度平均值>20MPa	<0.11	0.11～0.14	0.14～0.18	≥0.18

表3　混凝土质量等级（设计龄期）

混凝土抗压强度标准差（σ，MPa）	抗压强度标准值	优秀	合格
	≤20	<3.5	≤4.5
	20～35	<4.0	≤5.0
	≥35	<4.5	≤5.5

（3）已建成的混凝土建筑物，应适量地通过钻孔取芯和压水试验进行评定，大体积混凝土取芯和压水试验可按每万立方米混凝土钻孔2～10m，检测内容和评定标准应根据工程实际确定。

huoshanhui

火山灰

（pozzolan）　由火山喷发产生的直径小于2mm的矿物质，状如灰尘，颜色呈深灰色、浅灰色、白色和黄色。火山灰大多具有活性，磨细后可用作水泥的混合材料或混凝土的掺合料。水工混凝土所用火山灰掺合料为天然火山灰，可单掺，也可与粉煤灰等混合复掺。

火山灰坚硬、不溶于水，颗粒形貌呈片状、多棱角形状，磨细后的细度与水泥类似。火山灰的化学成分主要为 SiO_2、Al_2O_3、Fe_2O_3、CaO、MgO 和碱等。掺入混凝土后可改善混凝土的和易性，降低混凝土水化热等。检验火山灰的品质指标主要有烧失量、SO_3 含量、火山灰性、水泥胶砂28d龄期抗压强度比、放射性等，其中火山灰性是指在常温和有水的情况下可与石灰（CaO）反应生成水硬性化合物的性能。火山灰分为活性火山灰和非活性火山灰，同时满足上述指标要求的火山灰为活性火山灰，仅符合烧失量、SO_3 含量要求和放射性合格的火山灰为非活性火山灰。

在水利水电工程中，常用火山灰替代一部分水泥，以达到节约水泥和降低水化热的目的。火山灰的掺量一般应通过试验确定，在大体积混凝土和碾压混凝土中掺量较大。火山灰相对于其他掺合料，碱含量一般较高，当骨料中含有碱活性成分时，通过掺用火山灰来抑制碱-硅酸反应的效果较差，宜与粉煤灰混掺使用。



ji-dian shebei ji anzhuang gongcheng touzi

机电设备及安装工程投资 (cost of electromechanical equipment and installation works) 用于水电站全部机电设备购置及安装工程的投资。包括发电设备（水轮机、发电机、进水阀、起重设备、水力机械辅助设备、电气设备、控制保护设备、通信设备等）、升压变电设备（主变压器、高压断路器、隔离开关等设备）、航运过坝设备、安全监测设备、水文预报设备、消防设备、劳动安全与工业卫生设备及安装工程等投资。

设备购置投资按设备数量乘设备单价计算，设备单价由设备原价、设备运杂费、运输保险费、特大（重）件运输增加费、采购及保管费等组成。

安装工程投资按设备数量乘以安装工程单价计算。安装工程单价包括人工费、材料费、施工机械使用费、其他直接费、间接费、利润及税金。

jidun

机墩 (generator pier) 水轮发电机的支承结构。它承受发电机结构传来的全部静、动荷载，并将其传至厂房下部结构。机墩一般为钢筋混凝土结构，具有足够的强度、刚度和抗震性能。横轴发电机机墩结构比较简单，发电机定子、外壳、轴承支架用地脚螺栓分别锚固于混凝土机座上，机座与厂房下部结构连接为整体。立轴机组的机墩有圆筒式、框架式、环形梁式、矮墩式等，根据发电机型式及尺寸设计。

圆筒式机墩 上端与发电机风罩或发电机层楼板连接，下端固结于下部块体结构，发电机定子和下机架用地脚螺栓锚固于机墩，圆筒中间为水轮机井（坑），内有主轴、水轮机顶盖、控制环、接力器等。安装和大修水轮机时，水轮机转轮和顶盖等通过水轮机井吊入、吊出。水轮机井侧面设有进人孔，如图1所示。

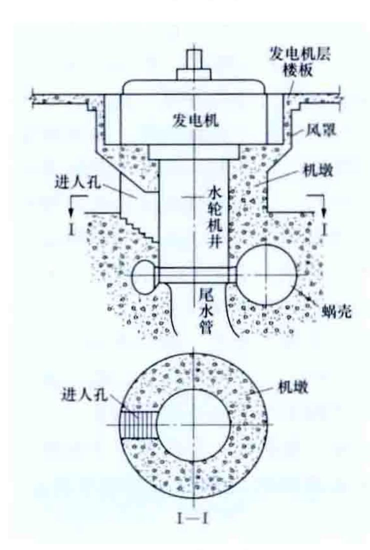


图1 圆筒式机墩

框架式机墩 发电机支承于水平大梁和柱所组成的框架上，柱的下端固定于块体结构，有的地下厂房斜撑于岩体上。柱体之间净空尺寸要满足水轮机转轮和顶盖吊装需求。有的水电站设计成水轮机转轮可从侧面平移搬运，不必吊起发电机转子。

环形梁式机墩 发电机支承于环形圈梁上。圈梁由若干立柱支承，固结于下部块体结构上。

矮墩式机墩 发电机定子和机架由蜗壳顶部外围混凝土上的矮支墩承受，支墩之间为发电机通风道，如图2所示。

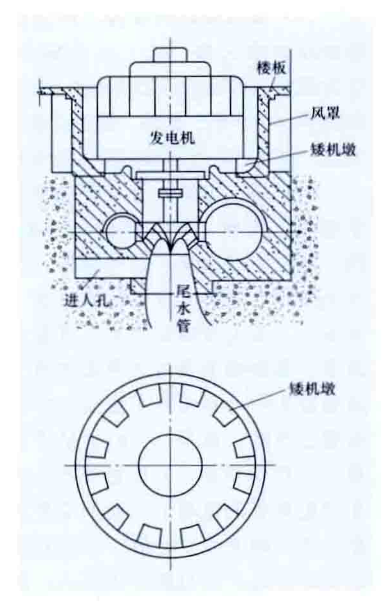


图2 矮墩式机墩

jichu jiage

基础价格 (basic price) 水电工程造价的基本要素价格，计算建筑安装工程单价的基本价格资料。主要包括人工预算单价，材料预算价格，施工用电、风、水价格，施工机械台时费，砂石料单价，混凝土材料单价等。

人工预算单价 直接从事建筑及安装工程施工的生产工人的工资、工资性津贴和属于生产工人开支范围的相关费用。包括基本工资和辅助工资。根据水电行业施工队伍的工资水平和工程所在地的劳动力市场价格水平综合确定，由水电工程定额管理机构定期发布。

材料预算价格 用于建筑安装工程项目中的消耗性材料、装置性材料和周转性材料由材料供应地运至施工工地分仓库的出库价格。包括材料原价、包装费、运输保险费、运杂费、采购及保管费和包装品回收等。材料原价一般采用出厂价或工程所在地的市场价格。对于用量多、对工程投资影响大的主要材料，包括钢材、木材、水泥、油料、火工产品等，一般须按规定编制材料预算价格。

施工用电、风、水价格 直接进入工程成本的生产用电、生产用风和生产用水的价格。由基本价、损耗摊销费和设施维护摊销费组成。施工用电价格根据施工组织设计确定的供电方式、供电电源、不同电源的电量所占比例、相应供电价格以及供电过程中发生的电能损耗、设施维护费用进行计算。施工用风、施工用水价格根据施工组织设计配置的相应系统设备，按台时总费用除以台时总供应量，并考虑过程中发生的损耗、设施维护费用进行计算。

施工机械台时费 消耗在建筑安装工程项目上的施工机械运转耗费的人工、材料及资金费用，包括基本折旧费、设备修理费、安装拆卸费、机上人工费和动力燃料费，以及应计算的车船使用税、年检费等。施工机械台时费根据台时费定额及有关规定计算。

砂石料单价 砂、卵（碎）石、块石、条石、料石等当地建筑材料的预算价格。自行采备时，按生产工艺流程、定额及有关规定计算；外购成品料时，按供应点运至施工现场

成品料堆场价格计算。

混凝土材料单价　每立方米混凝土材料价格，根据设计确定的混凝土配合比、各项材料用量、相应材料预算价格计算。

jiliu

急流 (supercritical flow)

弗劳德数（Froude number）Fr 大于1时的明渠水流形态。$Fr=v/\sqrt{gh}$，式中 v 为明渠断面平均流速，h 为明渠内水深，g 为重力加速度。陡坡泄槽水流、坝面溢流及山区溪流等，都是常见的明渠急流。

明渠水力学中按 $Fr>1$、$Fr=1$ 或 $Fr<1$ 划分为急流、临界流和缓流3种流态，见图1。

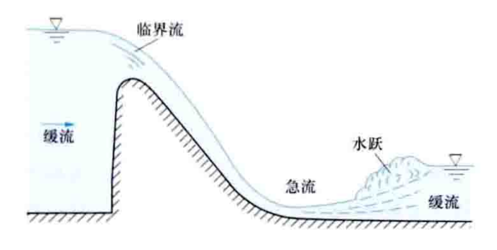


图1　通过溢流坝的水流

明渠急流特性可由 $Fr>1$ 的几层含义来说明。①急流中，断面平均流速 v 大于静水中的波速 $c=\sqrt{gh}$，局部扰动波不能向上游传播，有时在其下游由于扰动叠加形成冲击波（菱形驻波）。②$Fr>1$ 表明过水断面上单位水体的动能大于其单位势能，水流惯性力的作用大于重力的作用。③明渠急流特性还可用断面比能 $E_s=h\cos\theta+\alpha v^2/2g$ 说明。式中 θ 为渠底坡角，α 为流速分布不均匀系数。断面比能 E_s 是以渠底为基准面的单位水体总能量。当明渠过水断面的形状、尺寸和通过流量既定时，E_s 仅是水深 h 的函数，如图2所示。图中 E_s-h 关系曲线以 E_s 轴和45°线为渐近线，且有极小值，在极值处 $Fr=1$，称临界状态，相应水深称临界水深 h_{cr}。急流的特征条件是

$$h>h_{cr},\ \frac{dE_s}{dh}<0$$

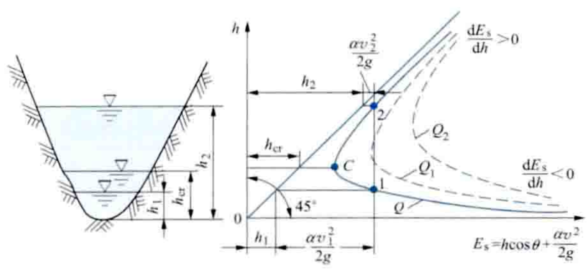


图2　断面比能曲线图

明渠水流呈均匀流状态时，常用其水面比降 i 大于或小于临界比降 i_{cr} 来判定其是急流还是缓流。临界比降的定义是在断面形状、尺寸、边壁糙度既定条件下，通过一定流量时，形成均匀流所对应的比降。急流的特征条件还可表示为

$$i>i_{cr}$$

明渠中急流到缓流的过渡形式通常以水跃衔接。

jisuan lixue

计算力学 (computational mechanics)

根据力学理论，利用计算机技术和数值方法，解决力学中实际问题的新兴学科，是力学的一个分支。计算力学是在高速电子计算机产生的基础上，伴随着适用于计算机的各种数值方法（矩阵运算、线性代数、数学规划等）以及有限单元法、有限差分法等新概念、新方法的出现而逐渐形成的。计算力学的主要研究内容包括：①计算力学的数值分析方法。主要研究求解力学问题偏微分方程数值解的基本理论和方法。②计算结构力学。采用数值方法，研究工程结构在外部（荷载）条件下的相应（包括应力、变形、频率、极限承载力等），以及工程结构在一定约束条件下的最优化结构设计方案。③计算流体力学。采用数值方法，对流体力学问题进行计算分析，对流体力学过程进行数值模拟。

计算力学的基本方法是对连续体进行离散化处理，用数值方法将力学问题的偏微分方程组转化为代数方程组，然后采用计算机求其数值解。随后，计算力学的领域进一步扩展至非连续介质问题，其基本方法是将离散的块体集合作为模拟对象，引入刚体动力学分析和时步积分技术进行求解。计算力学所用数值方法包括有限差分法、有限元法、变分法、加权残数法、边界元法、直线法和特征线法等，非连续介质的计算力学方法包括离散元、不连续变形分析（discontinuous deformation analysis，DDA）、流形元等。计算力学中使用最广的是有限差分法和有限元法。有限差分法是将未知函数定义域离散成有限个网格点，用网格点的未知量代替未知函数，用未知量的差商代替偏导数，用差分代数方程代替偏微分方程及其边界条件或初始条件。有限元法是将未知函数定义域离散成由节点连接的有限个单元，用节点未知量对单元未知函数进行插值，用各单元的插值函数代替未知函数，通过变分原理或加权残数法把偏微分方程组及其边界条件或初始条件化为节点未知量的代数方程组。计算力学已广泛应用于航空、航天、水电、土建、机械、船舶、车辆、核能和海洋等工程领域，成为解决实际力学问题的重要手段。

用计算力学求解各种力学问题，步骤一般包括：①根据对研究对象和所需求解问题的分析，运用力学概念和理论建立计算模型。②确定合理的数值计算方法。③编制计算分析软件进行数值计算，得出计算成果。④运用工程和力学的概念、理论对计算结果进行判断和解释，形成科学的结论。

Jianada shuineng ziyuan

加拿大水能资源 (hydropower resources of Canada)

根据英国《国际水电与大坝》杂志2011与2008年发布的《World Atlas》统计，加拿大水能资源理论蕴藏量22 500亿 kW·h/a，技术可开发量为9810亿 kW·h/a（2008年数据），经济可开发量为5360亿 kW·h/a。

加拿大国土面积998万 km²，东濒大西洋，西临太平洋，北为北冰洋，南与美国为邻。东部有阿巴拉契亚山脉和加拿大地盾形成的拉布拉多高原。西部有落基山脉、喀斯喀特山脉和海岸山脉。以这些山脉为发源地，以大西洋、太平洋、北冰洋和哈得孙湾为出口形成了水能资源丰富的河川。其中有流入大西洋的圣劳伦斯水系中的马尼夸根河和乌塔尔德河，流入哈得孙湾的卡涅皮斯考河、拉格朗德河、伊斯特门河、大贝莱茵河、布鲁内水系和纳尔逊河，流入太平洋的弗雷泽河和哥伦比亚河的上游段，流入北冰洋的马更些河等。降水量以东部和西部较多而中部较少。西部太平洋沿岸

地区年降水量高达2400mm，东部大西洋沿岸地区年降水量为1000～1400mm，中部为250～500mm。上述地形和降水等自然条件使水能资源分布很不均匀，东部和西部较多，中部相对较少，近60%的可开发资源集中在东部的魁北克省和西部的不列颠哥伦比亚省。

加拿大用电负荷中心主要在南部，因此南部水能资源首先得到开发，之后逐步移向北部。在水电建设中，加拿大重视梯级开发和跨流域引水开发，重视在河流上游建调节性能好的水库。加拿大电力系统中以水电为主，在1950年水电比重为96.4%，到1995年仍占61.6%。据联合国《世界能源统计年鉴》，加拿大到1995年底水电装机容量为63 600MW，年发电量为3308亿kW·h。开发较充分的河流有拉格朗德河、纳尔逊河、马尼夸根河、哈密尔顿河和哥伦比亚河上游。拉格朗德二级水电站位于魁北克省北部詹姆斯湾拉格朗德河上，是拉格朗德梯级开发中最重要、规模最大的工程，装机容量7326MW，工程分两期建设，一期工程于1982年完工，二期工程于1991年完工。丘吉尔瀑布水电站位于拉布拉多半岛纽芬兰省丘吉尔河上，装机容量5428MW，工程于1974年建成。根据英国《国际水电与大坝》杂志2011年发布的《World Atlas》，2010年加拿大水电装机容量超过75 000MW，年发电量3480亿kW·h，占水能资源技术可开发年电量的29%左右。

jianxiu rongliang

检修容量 (maintenance capacity) 见电力电量平衡。

jianxiu zhamen

检修闸门 (bulkhead gate) 水工建筑物和设备等检修时用以挡水的闸门。一般在预定的检修时间内使用，故仅需在静水条件下启闭操作。

布置 检修闸门的数量根据孔口数量、检修条件和建筑物及设备的维修条件而定，一般多个孔口共用一扇检修闸门，选用移动式启闭机操作，必要时，也可每孔设置一扇。

门型 常用的检修闸门形式有叠梁式、浮动式、直升式平面闸门和拱形闸门等。叠梁闸门漏水量较大，多用于小型水电工程。浮动闸门适用于大跨度多孔口的溢洪道和水闸，通常利用机动船作为闸门的移运设备，土建结构相对简单，但闸门体型和自重大，平时需设置专门的停放区，挡水工作前的就位和沉浮等操作较为复杂费时，门体内需设置较复杂的充排水设备。直升式平面闸门使用最为普遍，尤以平面滑动闸门居多，其支承结构简单，便于制造、安装和运行。拱形闸门适用于大跨度露顶式孔口，也有用于潜没式孔口的。

启闭方式 检修闸门在提门前需往门后充水，使闸门前后平压。检修闸门的充水方式与事故闸门类似，同时还应在闸门后设置足够面积的通气孔，以满足充水平压时的排气。计算检修闸门启门力时，应考虑一定的水位差。

jianpai xiaoyi

减排效益 (benefits of emission reduction) 水力发电作为可再生能源，部分替代化石能源，间接减少污染物和温室气体排放所产生的效益。

水能是自然界中可以不断利用、循环再生的一次能源，水能的利用方式主要是水力发电，即通过运用水的势能和动能转换成电能等形式而被人们利用。水电站在运行过程中不产生污染物，可部分替代煤炭、石油等化石能源，减少SO_2、NO_x、烟尘、CO_2等污染物的排放。

jianshe zhengdi fanwei

建设征地范围 (scope of land acquisition) 为确定水电工程的规模和建设需征收征用土地所涉及的区域。一般包括水库淹没影响处理区、枢纽工程建设区。水库淹没影响处理区包括水库淹没区及因水库蓄水而引起的浸没、坍岸、滑坡、岩溶地区排洪不畅和其他受水库蓄水影响的地区，按照上述区域的外包线确定。水库淹没区又常区分为经常淹没区和临时淹没区。建设征地范围内的土地分为永久性征收和临时征用两种，临时用地期限一般不超过两年。水电工程项目核准前，中国土地管理部门将根据土地利用总体规划、土地利用年度计划等，对水电工程枢纽工程建设区、水库淹没影响区的用地事宜进行审查，提出建设项目用地预审意见，此为上报项目核准的必备文件。

（1）经常淹没区。通常指正常蓄水位以下，受库水位持续或反复淹没的地区，按照正常蓄水位相应高程，以坝轴线为起始断面，水平延伸至与天然河道多年平均流量水面线相交处；多年调节水库的正常蓄水位并不是每年都能达到。

（2）临时淹没区。为正常蓄水位以上，受水库洪水壅高的沿程回水以及风浪、船行波爬高、冰塞壅水淹没的地区。中华人民共和国国家发展和改革委员会2007年12月发布的DL/T 5064—2007《水电工程建设征地移民安置规划设计规范》规定，水库淹没处理的设计洪水标准，应根据淹没对象的重要性和耐淹程度，结合河道洪水特性和水库调节运用方式，在安全、经济和考虑其原有防洪标准的原则下，在下表所列范围内选择。表中未列的铁路、公路等专项设施的设计洪水标准，宜按各专业规范选定。水库沿程的设计回水位，还应根据河流输沙量的大小，考虑10～30年的泥沙淤积影响。

不同淹没对象设计洪水标准

淹没对象	洪水标准（频率,%）	重现期（年）
耕地、园地	50～20	2～5
林地、牧草地	正常蓄水位	—
农村居民点，一般城镇和一般工矿区	10～5	10～20
中等城市、中等工矿区	5～2	20～50
重要城市、重要工矿区	2～1	50～100

水库回水末端断面，通常是指设计洪水回水水面线与同频率天然洪水水面线之差0.3m处（如图1中$\Delta Z=0.3$m处）的计算断面，水库回水末端断面上游的淹没范围，采取水平延伸至与天然河道多年平均流量水面线相交处，如图1所示。

（3）浸没影响区。水库蓄水后，在一定地质条件下，库岸地下水位升高而形成土壤次生盐碱化、沼泽化、建（构）筑物地基沉陷及翻浆等现象的地区。预测浸没范围所依据的

水库水位为正常蓄水位。

（4）塌岸、滑坡地段。由于水库蓄水而使库岸受风浪冲击、水流侵蚀，使库岸坡形改变，岩石抗剪强度减弱及水位涨落引起库岸地下水动水压力变化而发生库岸再造变形的地段。一般将预测5～10年内可能出现的坍滑地段列为影响处理范围。

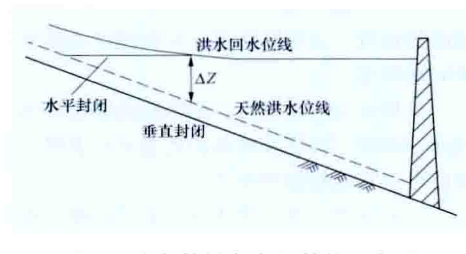


图1 垂直封闭和水平封闭示意图

（5）喀斯特影响区。在喀斯特地貌发育的石灰岩地区，流入水库的暗河出口，因受水库水位顶托或泥沙淤堵，致使库边或邻谷暗河入口处（漏斗、落水洞）的地面水排泄不畅或其排水出路阻断而加重内涝；地面高程低于水库水位的地方，将受倒灌淹没；库区若有贯穿性溶洞，也会产生渗漏淹没。

（6）库周影响区。水库蓄水后，失去生产生活条件而必须采取措施的库边或孤岛上的居民点，以及引水式电站形成的脱水影响地段。

水库淹没影响区如图2所示。

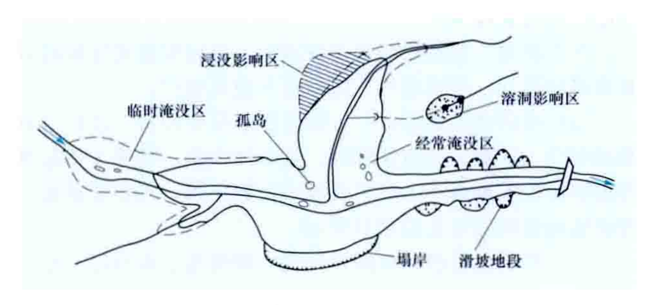


图2 水库淹没影响区示意图

jianshe zhengdi yimin anzhi

建设征地移民安置 （land acquisition and resettlement） 因水利水电工程建设而发生的征收征用土地、迁移居民、迁建城镇和村庄、处理专业项目、恢复移民生产生活条件以及城镇和专项设施功能的活动。在中国，建设征地移民安置一般包括确定建设征地范围、调查确认实物指标、编制及审批移民安置规划等前期工作，开展移民安置项目建设、组织移民搬迁并恢复移民生产生活、兑现补偿补助资金、进行库底清理、实施移民后期扶持等实施工作。水库淹没处理是建设征地移民安置的重要内容。

为了依法依规地开展建设征地移民安置涉及的相关工作，1992年中华人民共和国国务院以国发〔1992〕20号文批转了原国家计划委员会《关于加强水库移民工作若干意见》的通知。2006年7月7日国务院令第471号公布《大中型水利水电工程建设征地补偿和移民安置条例》，自2006年9月1日起施行。2007年12月国家发展和改革委员会发布了8个有关水电工程建设征地移民安置规划设计的规范，其中DL/T 5064—2007《水电工程建设征地移民安置规划设计规范》规定，水库淹没处理的规划设计工作包括确定建设征地处理范围，调查建设征地实物指标，参与工程建设方案论证，提出移民安置总体规划，进行农村移民安置、城（集）镇迁建、专业项目处理、库底清理、移民安置区环境保护和水土保持的规划设计，编制建设征地移民安置补偿费用概（估）算等任务。水利部2009年7月发布了3个有关水利水电工程建设征地移民安置规划设计的规范。各省级地方政府和部分移民安置行业管理部门都发布有建设征地移民安置工作的相关政策、规定。

水库淹没处理 对受到水库淹没及影响的人口、土地、各种设施及经济对象进行调查和处理的工作。河流规划开发方式、坝址选择、施工总布置和水库正常蓄水位选定，均需考虑淹没及影响的范围。发生水库淹没情况时，要根据淹没对象的重要性和淹没土地、迁移人口的数量，淹没损失对当地社会经济的影响等因素，研究淹没处理的技术可行性、经济合理性和妥善安置移民的可实施性。

水库淹没规模和性质 淹没损失的大小取决于枢纽工程筑坝的高低、水库面积与容积的大小、库区的河谷地貌形态和地质构造、自然资源的分布、社会资源和经济发展的状态等因素。淹没损失的性质需视不同的经济对象和它们所处库区的不同部位而有所区别，可归纳为3类：①就损失时间而言，可分为永久性损失和临时性损失；②就损失程度而言，有的可迁移或保护，有的不可迁移和保护，后者则完全失去本身的使用价值；③就所在的空间而言，有直接损失和间接损失。所以，进行淹没处理设计时须区分不同情况，针对不同淹没对象采取不同的处理措施。

jianshe zhengdi yimin anzhi buchang feiyong

建设征地移民安置补偿费用 （compensation cost for land acquisition and resettlement） 对水电工程建设征地影响范围内的土地进行征收征用，对人口进行迁移安置，对房屋以及居民点、城镇、专业设施等项目进行搬迁复建或处理，以及为安置移民而规划新建项目和开展建设征地移民安置工作等所需的各项资金。建设征地移民安置补偿费用列入水电工程的建设投资。补偿费用概（估）算的原则、补偿费用构成、组织与程序、编制深度要求等，应当符合国家的有关政策和规范。

建设征地移民安置补偿费用是一个十分复杂的社会经济问题，既关系到妥善安置移民和各种淹没对象得到合理恢复，又关系到正确处理国家、项目法人、地方政府、集体经济组织、移民个人等各方面之间的利益关系，还涉及合理补偿与长远发展的关系，同时与当时当地国家的政策、经济、政治状况也有较大关系。中国国务院令第471号文件《大中型水利水电工程建设征地补偿和移民安置条例》、国家发展和改革委员会发布的DL/T 5382—2007《水电工程建设征地移民安置补偿费用概（估）算编制规范》，以及水利部发布的有关水利水电工程建设征地移民安置规划设计规范对此都作出了相应的规定。

补偿费用概（估）算原则 按照中国政府有关政策规定，建设征地移民安置补偿费用概（估）算应遵循的原则有：

（1）征收的土地按照被征收土地的原用途给予补偿；征收土地的土地补偿费和安置补助费应满足农村移民生产安置

规划的资金需要。使用其他单位或者个人依法使用的国有耕地，参照征收耕地的补偿标准给予补偿；使用未确定给单位或者个人使用的国有未利用地，不予补偿。

（2）被征收土地上的附着建筑物按照其原规模、原标准或者恢复原功能的原则补偿；对补偿费用不足以修建基本用房的贫困移民，给予适当补助。移民远迁后，在征地范围之外本农村集体经济组织地域内的房屋、附属建筑物、零星树木等私人财产应当给予补偿。

（3）工矿企业和交通、电力、电信、广播电视等专项设施和中小学的迁建或者复建，应当按照其原规模、原标准或者恢复原功能的原则补偿。因扩大规模、提高标准增加的费用，由有关地方政府或者有关单位自行解决。

（4）农村移民居民点、城镇迁建的基础设施的补偿费用，按照新址迁建规划设计的基础设施费用计列。

（5）有关部门利用水库水域发展兴利事业所需投资，由有关部门自行解决。水库库底一般清理的费用列入建设征地移民安置补偿费用内。特殊清理的费用，由有关部门自行承担。

（6）建设征地移民安置补偿费用概（估）编制，宜采用与枢纽工程概（估）算相同的价格水平。水电工程项目核准前，规划设计有重大变更或开工年与概算编制年相隔两年及以上的，应根据开工年的政策和价格水平重新编制和报批。

补偿费用的构成 根据中国国家发展改革委发布的DL/T 5064—2007《水电工程建设征地移民安置规划设计规范》，补偿费用由建设征地移民安置补偿项目费用、独立费用、预备费3部分构成。其中，建设征地移民安置补偿项目费用由农村部分补偿费用、城镇部分补偿费用、专业项目处理补偿费用、库底清理费用、环境保护和水土保持费用组成，各项目费用均包括补偿补助费和工程建设费两部分。补偿费用宜分水库淹没影响区和枢纽工程建设区两部分进行计算并汇总。

农村部分补偿费用 包括征收和征用土地的补偿费用、搬迁补助费用、附着物拆迁处理补偿费用、青苗和林木补偿费用、基础设施建设补偿费用和其他补偿费用等。

（1）征收和征用土地的补偿费用：包括征收土地的土地补偿费用（土地补偿费和安置补助费）、征用土地的土地补偿费用。根据征收和征用各类土地补偿单价和补偿实物指标中的土地数量计算。

（2）搬迁补助费用：包括人员搬迁补助费用，物资、设备运输补助费用和临时交通设施费用等。其中，人员搬迁补助费用包括人员搬迁交通运输补助费、搬迁保险费、搬迁途中食宿及医疗补助费、搬迁误工费、建房期补助费等费用项目；物资、设备运输补助费用包括搬迁安置人口私有物资、设备运杂费，搬迁安置人口私有物资损失补偿费等费用项目；临时交通设施费用包括工程建设费用和改善设施的补助费用。

（3）附着物拆迁处理补偿费用：包括房屋及附属建筑物拆迁补偿费用、农副业及个人所有文化宗教设施设备补偿费用、企业的处理费用、行政事业单位的迁建费用、其他补偿费用等。

（4）青苗和林木补偿费用：包括青苗补偿费，零星林木补偿费，征、占用林地和园地林木补偿费。

（5）基础设施建设补偿费用：包括建设场地准备费用，场内道路、供水、排水、供热、电力、电信、广播电视、防灾减灾等工程的建设费用和工程建设其他费用。具体可根据迁建规划设计增减。

（6）其他补偿费用：包括建房困难户补助费、生产安置措施补助费、义务教育和卫生防疫设施增容补助费、房屋装修处理费等。

城镇部分补偿费用 包括搬迁补助费用、附着物拆迁处理补偿费用、青苗和林木的处理补偿费用、基础设施建设补偿费用和其他补偿费用等。

专业项目处理补偿费用 包括铁路工程补偿费用、公路工程补偿费用、水运工程补偿费用、水利工程补偿费用、水电工程补偿费用、电力工程补偿费用、电信工程补偿费用、广播电视工程补偿费用、企业事业单位补偿费用、防护工程补偿费用、文物古迹补偿费用及其他补偿费用等。专业项目处理补偿费用计算应不包括基本预备费和价差预备费，其中科研勘测设计费只计列初步设计阶段以后的设计费。

库底清理费用 包括建筑物清理费、卫生清理费、坟墓清理费、林地清理费、其他清理费、其他费用等，按照同阶段库底清理设计的设计工程量与相应单价计算。

环境保护和水土保持费用 环境保护费用包括环境保护措施费、环境监测费、仪器及安装费、临时措施费、独立费用等，根据环境保护设计成果计算。其中科研勘测设计费只计列初步设计阶段以后的设计费；水土保持费用包括工程措施费、植物措施费、施工临时工程费、独立费用等，根据水土保持设计成果计算，其中科研勘测设计费只计列初步设计阶段以后的设计费。

独立费用 包括项目建设管理费、移民安置实施阶段科研和综合设计（综合设代）费以及其他税费等。

（1）项目建设管理费：包括建设单位管理费、移民安置规划配合工作费、实施管理费、技术培训费、移民安置监督评估费、咨询服务费、项目技术经济评审费，其计费基数为建设征地移民安置补偿项目费用。

（2）科研试验费：根据设计提出的研究试验内容和要求进行编制。

（3）综合设计费：用于移民安置实施阶段实施移民安置规划而进行的综合设计的费用，其计费基数为建设征地移民安置补偿项目费用。

（4）其他税费：包括耕地占用税、耕地开垦费、森林植被恢复费、新菜地开发建设基金等，按照国家行业主管部门和省、自治区、直辖市的规定计算。

预备费 包括基本预备费和价差预备费。

（1）基本预备费：预可行性研究阶段，基本预备费统一采用规定的费率；可行性研究阶段，专业项目处理补偿费用、环境保护和水土保持费用等部分的基本预备费执行相应行业的规定取值计算，其他项目的基本预备费按统一按规定的费率计算。

（2）价差预备费：按国家投资主管部门的规定计列。

jianshe zhengdi yimin anzhi duli pinggu

建设征地移民安置独立评估 (independent evaluation of land acquisition and resettlement) 依据移民安置规划，对建设征地移民安置实施工作进行的客观性评价。独立评估由独立于项目业主及移民实施机构的具有移民独立评估能力的组织或机构，根据批准的移民安置规划设计

文件，对建设征地移民安置实施工作进行阶段性检查、调查、对比、分析，提供连续周期性的反馈信息，尽早发现和预测实施过程中的差距和潜在的薄弱环节，提出对实施工作进行调整改进、纠正偏差的建议和意见，并对实施效果进行阶段性客观评价，判断移民安置目标实现情况。移民安置独立评估的对象和范围、工作方式和内容等应当符合移民政策规范和委托合同的规定。

发展历程　非自愿移民独立评估的概念源于世界银行。世界银行1980年以后的移民政策规定，必须对移民安置文件中规定的活动进行监测和对移民安置文件中确定目标的实现程度进行分析评估。中国的移民独立评估最早起源于水电行业。1989年，按照世界银行的要求，在世界银行贷款项目水口水电站的移民安置工作计划中，提出了移民独立评估大纲，实质性工作从1991年开始，至1997年完成。此后，利用世界银行贷款兴建的海南大广坝水利枢纽、太湖防洪工程、四川二滩水电站、湖南江垭水电站、黄河小浪底水利枢纽等大中型水利水电工程，以及部分电力项目和一大批交通与城市项目，均按照世界银行对非自愿移民安置的政策性导则，开展了移民独立评估工作。根据金沙江下游水电移民工作协调领导小组办公室金协调办〔2011〕20号文件《金沙江下游水电移民工作协调领导小组办公室第四次会议纪要》的要求，从2012年开始，溪洛渡、向家坝两水电站也开展了移民安置独立评估工作。

独立评估对象和范围　独立评估的对象为建设征地范围内移民安置实施的全部工作，范围为移民区和移民安置区。

独立评估方式和内容　通过收集资料，采取移民农村集体经济组织和移民户抽样调查、典型调查、与移民和安置地原有居民座谈、各级移民干部座谈，现场查看等多种方式，调查移民安置实施工作情况，对移民政策宣贯情况、移民生产生活设施或资源配置及其恢复情况、基础设施功能恢复情况、安置区经济社会环境发展情况、移民参与实施工作情况、移民申诉渠道畅通情况、有利于推进移民工作的做法和经验、存在或潜在的问题及可能的风险等主要问题进行独立评估，给出独立评估意见，提出改进及改善移民工作的意见和建议。

jianshe zhengdi yimin anzhi zonghe jianli

建设征地移民安置综合监理　(comprehensive supervision of land acquisition and resettlement)　具有资质的移民综合监理单位受项目法人或地方政府委托，根据国家有关法律、法规和技术标准，依据经批准的移民安置规划和移民安置实施计划以及依法签订的有关合同或协议，按照实物指标落实、移民补偿费用兑现、农村移民搬迁安置、城镇迁建处理、专业项目复（改）建、水库库底清理、补偿费用等分类项目和内容，对移民安置实施的总体进度、综合质量、资金使用、设计变更、移民信息、合同等进行全过程监督、检查、记录、审核、报告和协调等工作。

发展历程　1993年，长江三峡水利枢纽移民安置工作中提出了移民监理的概念；1994年开始尝试开展工作并出台试行文件；1995年开始，三峡库区全面推行移民工程监理制度（综合监理和单项工程建设监理）。1996年，小浪底移民监理单位正式开展专门的移民项目监理工作。1997年初，万家寨工程移民监理进场开展工作。1998年，棉花滩水电站进行移民监理试点；1998年3月，中国电力工业部发布《水电工程水库移民监理规定》，提出新建大中型水电工程实行水库移民监理制度，并对移民综合监理的程序、内容、委托形式等进行了明确规定。此后，所有新建的大型水电工程和大部分大型水利工程推行了移民综合监理。移民安置综合监理与工程建设监理相比，具有重大差异。

监理内容　包括总体进度控制、综合质量控制、资金使用监督、设计变更监督、信息管理、合同管理、工作协调等。

总体进度控制　对所有移民搬迁安置、兑现补偿项目和移民单项工程建设项目完成情况所进行的监督检查、分析评价和控制。

综合质量控制　通过采用对移民安置目标与标准、移民工程的功能恢复程度的分析评价和移民单项工程施工质量评价的方式，对移民安置实施工作完成的总体质量和移民单项工程项目的建设质量所进行的监督检查和控制。

资金使用监督　对照审批的移民补偿项目概算和下达的使用计划，对建设征地移民安置补偿费用的拨付和使用情况进行监督检查。

设计变更监督　对移民安置实施过程中出现的重大变更，要求实施方或有关单位提供书面说明，完善相关材料和程序，并签署移民综合监理意见，上报省级移民工作管理机构。

信息管理　对综合监理机构的内部信息和移民安置实施机构的外部信息进行管理。

合同管理　对移民搬迁安置、补偿兑现协议的签订、执行、完成情况和资料的归档情况进行定期检查。

工作协调　通过会议协调和日常协调等形式对移民安置过程中出现的问题进行协调处理。会议协调包括监理例会、工作例会、设计联络会和专题会议，日常协调包括电话沟通、走访、函件、约谈等各种方式。

监理特点　移民安置综合监理和单项工程建设监理都属于移民工作中的监督管理活动，其行为主体都是接受委托和被授权的社会监理单位。监理工作的主要内容都是进度控制、质量控制、投资控制、合同管理、信息管理及组织协调等，但移民安置综合监理在监理对象、监理目标、监理职能等方面，具有显著的特点。

在监理对象上，综合监理受上级移民主管部门或水电项目业主的委托，对地方政府和相关部门实施移民安置的活动和行为进行监督管理，其范围涉及一定区域内的所有移民项目，包括迁建项目和资金补偿项目；而单项工程建设监理则是受工程项目业主委托，对工程项目施工单位的建设行为进行监督管理。

在监理目标上，综合监理的进度目标是移民安置综合进度，在注意保持移民工程进度与枢纽工程建设进度相衔接的前提下，强调移民工作每项活动必须有合理的工作周期；而单项工程监理的进度目标则是具体工程项目进度，即对业主要求的项目工期的满足程度。综合监理的移民资金使用控制目标是按照移民政策和批准的概算及下达的计划，申请、拨付和使用移民资金，并完成确定的移民任务；而单项工程建设监理的投资控制主要是建造成本控制与节约。综合监理的质量目标是移民安置综合质量，包括移民工程实体质量、生活生产配套设施完善程度及移民对安置条件的满意程度；而单项工程建设监理的质量目标主要是单项工程实体质量、安

全性等质量属性。

在监理职能上，综合监理根据委托方的授权，参与移民安置管理活动，其职能主要为监督、信息反馈、核验鉴证、咨询服务、工作建议等，对其监督的移民安置责任主体不具有强制性的执行力和约束力，其监理意见需经委托方，即在上一级移民管理机构采纳后由委托方指令实施；而单项工程建设监理具有委托代理的性质，通过监理合同授权实施对工程建设活动的直接控制，如受托选择分包商，签发开工令、停工令、复工令和计量支付的权力，对项目施工单位的处理意见具有约束力。

jianzhu gongcheng touzi

建筑工程投资 (cost of civil works) 用于水电站主体建筑工程和其他永久建筑工程建设的费用。主体建筑工程包括挡水工程、泄水工程、输水工程、发电工程、升压变电工程、航运过坝、灌溉渠首和近坝岸坡处理工程等。其他永久建筑工程包括交通工程、房屋建筑工程以及其他工程等。

主体建筑工程投资按工程量乘以工程单价计算。建筑工程单价包括人工费、材料费、施工机械使用费、其他直接费、间接费、利润及税金。

其他永久建筑工程投资根据不同阶段设计深度和项目类别，按工程量乘以工程单价（单位造价指标）或按主体建筑工程投资百分比计算。

jiangshui

降水 (precipitation) 从天空降落到地面的液态和固态的水，如雨、雪、雹等。降水量是指某一时段内的未经蒸发、渗透、流失的降水，在水平面上积累的深度，以 mm 计。

降水是地表水、地下水的来源，与国计民生关系密切。在江河流域规划治理、水利水电工程设计、建设及防汛抗旱等各项工作中，降水量都是重要的基础资料。水文站、雨量站和气象台（站）均观测降水。有的水位站也兼测降水。截至 2010 年底，中国水文部门观测降水的站点共有 20 438 个（台湾省未计）。中国近代观测降水最早的有连续记载的雨量站是北京站，建于 1841 年；其次是上海的徐家汇站，1873 年起观测。

中国测记降水量的标准时制是以北京时间 8 时为日分界，从本日 8 时至次日 8 时的降水量作为本日的降水量。观测降水量常用的仪器有雨量器和自记雨量计。中国气象部门规定，24h 内雨量不到 10mm 为小雨，10～24.9mm 为中雨，25～49.9mm 为大雨，大于 50mm 为暴雨。

一个地区降水量的多少与其距水汽源地的远近、天气系统（如冷锋、低槽、低涡、切变线及热带风暴等）活动情况和地形条件等有关。世界陆面降水分布很不均匀，赤道地带和东南亚季风区降水量最多，中纬度地区次之，副热带沙漠地区和两极地区降水很少。印度喜马拉雅山南坡的乞拉朋齐平均年降水量为 11 000mm，是世界降水量最多的地方。中国平均年降水量为 648mm，小于世界陆面平均年降水量（800mm）。中国幅员辽阔，地形复杂，平均年降水量在地区上分布极不均匀。年降水量从东南沿海向西北内陆逐渐减少，山地多于平原，迎风坡多于背风坡。浙、闽、粤、台各省平均年降水量一般大于 1500mm，台湾基隆东南的火烧寮实测平均年降水量为 6569mm，实测最大年降水量达 8408mm（1942 年），是中国年降水量最大的地方。平均年降水量长江中下游一般为 1200～1400mm，淮河流域为 700～1400mm，黄河及海河流域为 500～700mm，东北为 350～700mm，西南云贵高原一般为 700mm 以上，西北内陆绝大部分干旱少雨，塔里木盆地和青海柴达木盆地不足 25mm；吐鲁番盆地托克逊站为 7.1mm，1968 年降水量仅 0.5mm，是中国年降水量最少的纪录。中国处于季风地带，大部分地区年降水量都集中在夏季，6～8 月的降水量大多占年降水量的 40%以上，北方一般大于 60%～70%。

jiaohe hongshuiwei

校核洪水位 (check flood level) 水库遇到大坝的校核标准洪水时坝前达到的最高水位。该水位也是设计考虑最不利水文条件下的最高库水位。水库遇到大坝设计标准洪水时坝前达到的最高库水位称为设计洪水位。校核洪水位以下的库容称为总库容，总库容是划分水电站等级的依据之一。校核洪水位与防洪限制水位之间的库容称为调洪库容，其中包括防洪高水位与防洪限制水位之间的防洪库容。校核洪水位和设计洪水位是水电站水工建筑物安全设计的依据。

当遇设计洪水或校核洪水时，水库利用所有泄水建筑物的泄水能力敞泄出库。在入库洪水涨水阶段，入库流量大于泄水能力，部分水量蓄水入库，库水位抬高，泄水能力也相应增加。在入库流量开始消落直至等于泄水能力时，库水位达到最高。此时，对应于设计洪水的水库最高水位为设计洪水位，对应于校核洪水的水库最高水位为校核洪水位。对于有防洪任务的水库，在入库洪水开始涨水，但涨到下游防洪保护对象的防洪标准洪水以前，水库据下游防洪要求的安全泄量控制泄量。但洪水涨到大于防洪标准洪水以后，或库水位超过防洪高水位时，水库由控泄改为敞泄，直到设计洪水位或校核洪水位。

校核洪水位和设计洪水位是在水电站设计阶段选定，一般是在防洪限制水位和防洪高水位已经选定的条件下进行。这两个水位与泄水建筑物的规模有关，并决定坝高。当采用的泄水建筑物泄水能力较大时这两个水位将较低，一般坝体工程量较少；反之，这两个水位较高，一般坝体工程量较多。所以，这两个水位一般是根据泄水建筑物和坝体所需投资最少的原则选定。

jiechu guanjiang

接触灌浆 (contact grouting) 将浆液灌入混凝土与基岩或与钢板之间的缝隙的灌浆，这种缝隙是由于混凝土的凝固收缩而造成的。接触灌浆的主要作用是填充缝隙，以加强接触面间的密实性和增强接触面结合能力，防止漏水。

在岩石地基上建造混凝土坝，当混凝土体积收缩后，两者之间会产生缝隙，对于这类缝隙需要进行接触灌浆。

在岩石比较平缓的部位，接触灌浆常与岩石中的帷幕灌浆结合进行，将坝体混凝土与岩石的接触部位作为一个灌浆段，段长不超过 2m，单独进行灌浆。

在岸坡岩石边坡陡于 45°的部位，接触灌浆的设计和灌浆方法与接缝灌浆类似，可采用钻孔埋管灌浆法、预埋管灌浆法或直接钻孔灌浆法。按设计要求设置止浆片，按高差或

面积形成封闭灌区。主要是需在接触部位形成出浆点、出浆线或出浆面，也设置有进浆管、回浆管、排气管。岸坡接触灌浆必须等待坝块混凝土的温度达到设计规定值后方可进行。

在钢管或钢板结构物周围浇筑混凝土，当混凝土体积收缩后，两者间同样会产生缝隙，对此缝隙也要进行灌浆。其施工程序为：①在钢板上锤击或采用物探方法检查，画出脱空区。②视脱空区面积的大小，确定孔数，布置孔位。每个脱空区至少布置两个孔，其中一个为灌浆孔，靠近脱空区的底部；另一个为排气孔，位于脱空区的顶部。③钻孔。④灌浆。⑤孔口封堵。

灌浆施工自下端开始，逐渐向上。为了防止浆液沉积析水，致使浆体凝固后仍留有空隙，故采用浓的水泥浆灌注。

接触灌浆必须做好工序的质量控制和检查，灌浆质量根据工程实际情况，采用钻孔取芯、接触面凿槽检查和压水试验等综合评定。

jiefeng guanjiang

接缝灌浆 (joint grouting)　通过埋设管路或其他方式将浆液灌入混凝土建筑物结构缝的灌浆。主要作用是改善建筑物传力条件和增强整体性，如混凝土坝纵缝和横缝的灌浆。

接缝灌浆一般通过特设的灌浆管路系统进行。灌浆系统按缝面出浆方式的不同，分为点出浆、线出浆和面出浆3种。①点出浆。采用预埋方式，在浇筑块间的缝面上设置排气槽，并预埋出浆盒；在浇筑块内预埋进浆管、回浆管、灌浆支管、排气管及止浆片等。②线出浆。采用塑料管拔管技术措施，在缝面上形成出浆线，用以代替出浆盒，其他管路系统仍然埋设。③面出浆。采用出浆槽方式，由分别与进、回浆管相连的灌区底部的出浆槽和灌区顶部的排气槽，以及相应的键槽及止浆片等组成。点出浆为最早的接缝灌浆方式，线出浆的灌浆效果较点出浆好，面出浆技术则得到了广泛的应用。

只有当灌缝层混凝土及其上的压重层混凝土的龄期和温度均达到设计规定值时，方可进行灌浆。

灌浆施工按自下而上的顺序分层进行。混凝土重力坝的灌缝层高度常采用9～12m，缝面面积为200～300m^2。

对灌区的灌浆系统进行通水检查，以了解灌浆管路和缝面通畅情况，发现问题，进行处理，直至满足要求时止。例如，排气管若不出水，则需补打排气孔，直至能将缝面空气排出有水返出时止。灌浆前再进行一次预灌性压水检查。

在开始灌浆前，灌浆管路和灌缝缝面尚需充水浸泡24h。

灌浆采用水泥浆，水灰比一般分为2、1、0.6（0.5）三级，先稀后浓进行灌注。当最浓级浆液灌注一定时间，排气管出浆也达到此级浓度，且排气管口处压力达到设计规定值时，就可结束灌浆。若达不到上述标准，在顺灌结束后，应立即用最浓级浆液由排气管处进行倒灌。

灌浆用的水泥应有足够的细度，水泥强度等级不低于42.5，细度要求其通过80μm方孔筛的筛余量大于5%。接缝张开度小于0.5mm时，其细度要求通过71μm方孔筛的筛余量不大于2%。

接缝灌浆质量通常根据对施工记录资料的检查和分析、钻孔取样、压水试验，以及缝面凿槽检查等多项工作综合评定。

jieli

节理 (joint)　岩体中由各种成因形成的有规律的破裂面的统称，其两侧岩层一般没有明显的相对错动。节理面和断层面一样，可用产状确定其空间分布的几何特性。节理常有规律地成群出现，成因相同又互相平行的节理构成一组节理，几组有成因联系的节理构成一个节理系。节理的规模，短的延展只有几厘米或几十厘米，长的可以沿走向延伸几百米。

节理按成因分类可分为原生节理、构造节理和次生节理。节理还可按其走向分别与岩层走向或褶曲轴相平行、垂直与斜交，划分为走向节理（纵节理）、倾向节理（横节理）与斜向节理（斜节理）。

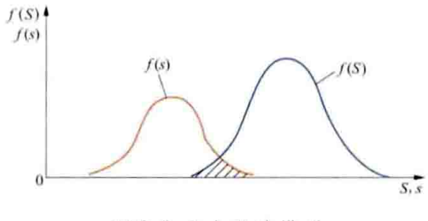
原生节理　岩石在成岩过程中所产生的节理。如沉积岩在成岩过程中，由于脱水，体积收缩而产生的节理。岩浆岩在冷凝过程中由于体积收缩而产生的节理等。

构造节理　岩石受构造作用所形成的节理。按其力学成因，又可分为剪节理和张节理两类。①剪节理。由剪应力作用形成，常成对出现，称为共轭剪节理。节理面平直光滑，延伸性好，产状较稳定。砾岩或粗砂岩中的剪节理能平整地切割砾石和粗砂碎屑。节理面多闭合，裂面常见擦痕。②张节理。由张应力作用形成，节理面粗糙，延伸性差，但沿其尖灭方向追索，则往往在不远处又可断续出现，分支和重合现象较常见。节理面没有擦痕、擦光面等痕迹。在粗砂岩和砾岩中节理面常绕砾石粗砂颗粒而过，并不切穿上述颗粒。由于节理面大多张开，易被岩脉、矿脉充填。

次生节理　地表岩石遭受风化、边坡重力与卸荷等作用所产生的节理。如风化节理、重力节理与卸荷节理等。

jiegou kekaodu

结构可靠度 (structural reliability)　结构在规定的条件下和规定的时间内，完成规定功能的概率。结构可靠度与结构强度、载荷、应力和使用环境、维护条件等因素有关。如由于结构材料的化学成分、物理组成、内部质量等的不均匀性，加工尺寸及加工工艺的不稳定性等随机因素的影响，使结构强度 S 具有离散性，而呈分布状态 $f(S)$，如图所示。同样，在温度、湿度、辐射、腐蚀以及使用方法、维护方法和操作人员技术水平等随机因素的影响下，应力 s 也是离散的，呈分布状态 $f(s)$，如图所示。由于强度和应力均具有统计性，因此，结构完成规定的功能亦具有概率性。



强度和应力干涉模型

图为结构强度和应力干涉模型。当强度和应力两条分布曲线的尾部发生干涉或重叠时，应力大于强度，此干涉区（图中阴影部分）即为结构发生失效的概率 $P(t)$。若强度和应力的离散程度小，则干涉区小，可靠度高。另外，随着时间的推延，结构可靠度也将降低。因此，在设计和评定结构功能时，必须规定相应的使用条件和寿命。

可靠性技术建立在统计概率理论基础上，由于考虑了影

响结构功能的各个随机因素及其离散性，所以用来度量结构的可靠性和安全性，较常规的安全系数法或许用应力法，更切合实际。从分析中可知如能有效地控制影响强度和应力的各种因素，减少它们的离散性，可以提高结构的可靠度。因而这种技术在结构和其他各类工程中都得到日益广泛的应用。

jiegou lixue

结构力学

（structural mechanics） 研究工程结构受力和传力的规律以及结构优化的学科，是固体力学的一个分支。工程结构是指能承受和传递外载荷的系统，包括杆、板、壳以及它们的组合体。结构力学的研究任务是：①研究外载荷作用下工程结构中的应力、应变和位移的分布规律，为工程设计提供依据；②研究建立工程结构分析的方法和计算公式；③分析工程结构承受和传递荷载的能力；④研究和发展新型工程结构；⑤结构优化设计。

结构分类 工程结构按其研究对象可分为杆系结构、薄壁结构和整体结构 3 大类，现代还发展了夹层结构和复合材料结构。

杆系结构 由许多杆件连接起来的系统。其连接点称为节点。按其连接方式又可分为桁架和刚架。桁架中各杆件通过节点只传递力，而刚架中各杆件通过节点能传递力和力矩。两者都有平面和空间情况，前者所有杆件及所承受的载荷都位于同一平面内，而后者则不受此限制。

薄壁结构 由薄板、薄壳和细长构件组成的，能以较少的材料承受较大的载荷的轻型结构。它又可分为薄壁梁、薄板和薄壳。薄壁梁按断面有工字形、U 形等不闭合形状的开口薄壁梁，也有圆管或方管等闭合形状的闭口薄壁梁。薄板和薄壳都是薄片状结构，平分各点厚度的面称中面。前者的中面是平面，后者的中面是曲面。前者受力后只引起弯矩和剪力，后者受力后还可引起薄膜力，可以大大增加薄壳承载外载荷的能力。随着航空工业的发展，薄板和薄壳材料有很大改进，如夹层板壳、复合材料板壳等。

整体结构 不能简化为杆系或薄壁结构的所有其他工程结构。一般情况下，其分析计算只能借助有限元等数值方法进行。

研究内容 结构力学研究的内容按其性质主要可分为结构静力学、结构动力学、结构稳定理论、结构断裂和疲劳理论等方面。

结构静力学 研究工程结构在静载荷作用下的弹塑性变形和应力状态以及结构优化的问题。静载荷是指不随时间变化的外加载荷。变化较慢的载荷也可近似地看作静载荷以简化分析计算工作。结构静力学是结构力学其他分支学科的基础。

结构动力学 研究工程结构在动载荷作用下的响应和性能问题。动载荷是指随时间而改变的载荷。在动载荷作用下结构内部的应力、应变和位移必然是时间的函数。其分析计算方法比静力学问题复杂得多，只有少数情况下有理论解，一般结构因形状不规则等因素只能求近似解，即先把真实结构离散化为一个具有有限个自由度的数学模型，在确定载荷后导出运动方程，再选用数值分析的方法求解。

结构稳定理论 研究工程结构的稳定性问题。现代工程中大量使用细长型和薄壁型结构，它们受力时往往会在内部应力远小于屈服应力的情况下发生失稳现象，即结构产生过大的变形从而降低甚至丧失承载能力。使结构发生失稳的载荷称为临界载荷，确定临界载荷是结构稳定理论的最重要内容。

结构断裂和疲劳理论 研究工程结构在外载荷作用下断裂和疲劳的过程和原因。工程结构内部不可避免地存在裂纹，会在外载荷作用下扩展而引起断裂破坏，也会在幅值较小的应变载荷作用下扩展而引起疲劳破坏。断裂和疲劳的研究历史不长，还不很完善，但发展很快。

简史 结构力学以前只是包含在材料力学、理论力学等学科中，直到 19 世纪中叶才形成独立的学科。1826 年 C. L. M. H. 纳维（C. L. M. H. Navier，1785－1836）提出了求解静不定问题的一般方法。1864 年 J. C. 麦克斯韦（J. C. Maxwell，1831－1879）创立单位载荷法和位移互等原理，为求解超静定结构的力学奠定了基础。1873 年 A. 卡斯蒂利亚诺（A. Castigliano，1847－1884）提出了卡氏第一定理，导出了多腹杆桁架的近似算法。这一时期对于结构稳定性理论也做了一些研究。结构力学至此才初具规模。20 世纪初以来，由于航空、船舶和建筑等行业的发展，需要求解大规模的超静定系统。1914 年 A. 本迪克森（A. Bendixen）提出了转角位移法，1932 年 H. 克罗斯（H. Cross）提出了力矩分配法，推动了结构力学的发展。20 世纪 50 年代，M. J. 特纳（M. J. Turner）、L. C. 托普（L. C. Topp）等人提出了有限元法，使结构力学的分析求解与电子计算机联系起来，并出现了结构矩阵分析法，效率大大提高。70 年代以后出现了许多功能很强的分析程序，使许多复杂结构可以求解并得到可靠的结果，从而结构力学的面貌大大改观。

jiegou youhua

结构优化

（structural optimization） 研究在给定条件下采用最优化数学方法确定结构最优设计方案。传统的结构设计计算方法是试算法，即通过假定设计参数、进行计算检验、反复修改而得到一个符合设计要求的结构方案。它只是一个可行方案，通常不是给定条件下的最优方案。结构优化设计可更好达到预想目标和较好经济效果。结构优化有优化准则法和数学规划法两类。

优化准则法 从工程和力学观点出发，提出优化设计所应满足的某些准则，然后设法求出满足这些准则的结构方案。最简单、最常用的是满应力准则，它要求结构各控制点上的应力等于材料的允许应力，根据这个条件计算出结构的尺寸。除应力外，也可用变位、自振频率等作为控制条件。优化准则法计算比较简单，但它不能对结构的形状进行优化，只能在给定结构形状后，优选结构的断面尺寸，如厚度、惯性矩等。

数学规划法 把设计规范所规定的各项条件，如允许应力、允许变位、抗滑稳定、频率限制、允许渗透水力坡降等作为约束条件，用数学规划方法求出满足全部约束条件的最优解。所谓最优，并不单指造价最低，针对具体的工程，优化目标应根据工程要求综合考虑确定。例如，对于大坝体型的优化，如果以造价或体积为目标函数，优化结果将得到一个最经济的体型。如果以大坝的安全系数为目标函数，优化

过程中使目标函数取最大值，优化结果将得到一个在给定条件下的最安全体型。如果兼顾造价和安全度，则需要采用双目标优化模型。如还需考虑其他一些因素，则成为多目标优化设计。用数学规划法不但可以优选结构的断面尺寸，还可以对结构的形状进行优化。结构优化通常是非线性问题，要用非线性规划方法求解。在结构优化过程中所要选择的变量称为设计变量，如钢筋混凝土梁的高度、宽度及各部位的钢筋截面积；拱坝的坝轴线位置及不同高程的半径、厚度等。当只有一两个变量时，可用图解法或分析法（乘子法）求解。当设计变量不超过 10～15 个时，可用复形法求解。当设计变量超过 10～15 个时，可用序列线性规划法、罚函数法、梯度投影法等方法求解。

大型复杂结构的优化设计，往往涉及多个优化目标，设计变量和约束条件之多，多达成百上千，一般的优化计算方法根本无法求解。对这种大规模、多类变量、多非线性约束的复杂结构优化设计，需要采用分解优化方法。分解优化方法的思想是：先把一个大规模的、复杂的优化设计问题分解为若干个较为简单的、相互或串行、或并行、或一般树形结构的子问题，在每一个子问题中只处理一类设计变量，因而，每一个子问题的求解相对比较容易。分解优化方法的难点在于如何处理各子问题之间的耦合影响。一般的做法是利用一阶或二阶导数传递子问题之间的耦合影响，然后迭代求解。因此，分解优化方法的核心内容包括：原问题如何划分成若干子问题、子问题之间的相互耦联影响怎样、如何综合拼装、采用序列迭代逼近原问题的最优解等。

参考书目

朱伯芳，黎展眉，张璧城．结构优化设计原理与应用．北京：水利电力出版社，1984.

朱伯芳，高季章，陈祖煜，等．拱坝设计与研究．北京：中国水利水电出版社，2002.

jieliu

截流

(river closure)　施工导流过程中，采用戗堤预进占形成龙口，通过高强度抛投材料封堵龙口，截断河水，迫使水流通过导流泄水建筑物下泄的工程措施，如图所示。截流前的准备工作包括：选择最适宜的截流时段和龙口位置，制订截流施工计划，根据计划要求准备各种抛投材料、施工机械和运输设备，检查维护各储料场至截流现场的道路、照明和通信设施，成立截流现场指挥机构，开展截流演练，落实截流过程水情预报及水流监测工作等。



三峡水电站截流

截流时段　选择截流时段要考虑截流流量和整个工程的施工布局。根据河流特性、水文、气象资料及近期预报，既要把握截流时机，选择最枯流量，又要能为后续工程施工留有余地。一般截流时段有汛后截流和汛前截流两类。汛后截流又称落水期截流，截流后河水流量逐渐减小，便于围堰工程抢在洪水到来之前完成，多数工程的截流时段都选在汛后。汛前截流又称迎水期截流，截流后河水流量逐渐加大，虽然有时河水处在最小流量，但因时在汛前，即使合龙顺利，由于汛前工期有限，也常造成围堰施工被动，一般不常选用。

在通航河道上截流，最好选在对航运影响较小的时段，因为在截流过程中，不论是否已修建临时或永久通航建筑物，由于截流时的水位变化很大，航运均需停止。

在有冰凌的河流，不能在流冰期截流。因为冰凌容易堵塞河床或泄水建筑物，壅高上游水位，给截流增加难度，且在截流后戗堤前堆积大量冰块、冰屑，增加合龙后的闭气（即用防渗土料及反滤料将合龙后的戗堤渗流通道堵塞的工程措施）难度，因冰块夹在防渗料或反滤料间，当气温转暖冰块融化时，将使围堰沉陷增加，破坏防渗体及反滤层性能，造成围堰渗漏。

龙口位置　通常根据截流戗堤处的地形、地质、交通和水力学条件选定。一般选在河床抗冲能力强的位置，在可冲刷河床，截流前要增加护底措施，以增大龙口河床的抗冲能力，减少合龙时抛投材料的抛投量和流失量，降低截流难度。如中国长江葛洲坝水利枢纽工程大江截流，龙口河床段选用拦石坎保护，护底范围为 120m×50m。在围堰或坝体预填筑部位，要用抗冲材料，如抛石、钢筋石笼、竹笼填石、铅丝笼填石等将临水面事前保护。

截流方法　通常采用的有立堵法、平堵法、立平堵法及其他截流法等几种。

立堵法　又称进占法，是将抛投材料从河床一端向另一端或从两端向中间抛投进占，逐渐缩窄河床直至合龙。这种截流方法相对简单易行，辅助设备少而经济，但龙口水流能量随着过流断面缩窄而不断加大，且流速分布不均匀，需要制备的重大抛投体材料相对较多，在合龙过程中随着流速的变化，要适时更换抛投材料种类、强度和抛投技术。根据水力因素，立堵截流又可分为单戗堤立堵截流和双戗堤或多戗堤立堵截流两种：①单戗堤立堵截流适用于龙口最大落差较小的河流，为大多数工程采用的截流方法；②双戗堤立堵截流或多戗堤立堵截流是有两道或多道截流戗堤同时进占，将河流龙口总落差分散，减小抛投块体质量，降低截流难度，一般适用于龙口最大落差较大的河流截流。

平堵法　在截流戗堤的上游或下游架设栈桥、浮桥或缆索式起重机，将抛投材料从栈桥、浮桥或由缆索式起重机倾入河床，使戗堤全线均衡上升直至露出水面的截流方法。这种截流方法的水力学条件相对较好，龙口单宽流量较小，出现的最大流速也较小，且流速分布比较均匀，抛投材料的单个质量也可较小，但栈桥、浮桥或缆索式起重机的架设困难，费用高昂，且截流工作面长，抛投强度大，施工技术比较复杂。

立平堵法　在宽河床，大流量截流常先用立堵进占缩窄河床，最后架设栈桥平堵的合龙方法。也有采用先平堵后立堵的截流方法。

其他截流法　有时为了克服特殊水力条件，充分发挥抛投材料数量或强度的特性，采用将河水瞬时截断的其他截流方法，如：①在河谷狭窄、两岸陡峭地形，或在龙口附近预先制作大块混凝土或堆置大量抛投料，用定向爆破或其他方法将岩体、预制块或预堆置的大量抛投料抛入龙口截流；②利用旧驳船、旧船壳浮运至截流龙口，合龙时用块石加载或打开专设阀门充水，将船体沉入龙口截流。

20 世纪 60 年代以后，由于大容量施工机械和运输设备的飞速发展，截流抛投强度不断提高，采用多戗堤（或宽戗堤）进占使落差分散等原因，大流量河道截流已不十分困难。1978 年巴西伊泰普（Itaipu）水电站采用 4 戗堤立堵，截流流量 8100m^3/s，最大落差 3m，最大流速 6.1m/s；1981 年中国长江葛洲坝水利枢纽采用单戗堤立堵，截流流量 4720m^3/s，最大落差 3.23m，相应最大流速 7.0m/s。1997 年中国长江三峡水利枢纽大江截流采用单戗堤立堵截流方法，截流流量 8480～11 600m^3/s，最大流速 4.22m/s，最大落差 0.66m。

Jin'anqiao Shuidianzhan

金安桥水电站

（Jin'anqiao Hydropower Station）　位于中国金沙江中游云南省丽江市境内，坝址距丽江市古城区 52.5km，距大理市公路里程 232.5km。电站开发任务以发电为主，兼顾旅游、航运等综合利用效益，见图 1。电站装机容量 2400MW，多年平均年发电量 110.43 亿 kW·h，以 2 回 500kV 输电线路接入云南电网。



图 1　金安桥水电站

水文和水库特性　坝址以上流域面积 237 357.6km^2，多年平均流量 1640m^3/s，多年平均年径流量 517.2 亿 m^3。500 年一遇设计洪水流量 14 700m^3/s，5000 年一遇校核洪水流量 17 900m^3/s。水库正常蓄水位 1418.00m，相应库容 8.47 亿 m^3；死水位 1398.00m，死库容 5.01 亿 m^3；防洪库容 0.66 亿 m^3；调节库容 3.46 亿 m^3，具有周调节性能。

工程地质条件　坝址区主要岩层为玄武岩。坝址地震基本烈度为Ⅷ度，100 年基准期超越概率 2% 的基岩峰值水平加速度为 0.399g。

枢纽布置　枢纽工程由大坝、泄水建筑物、厂房等组成，见图 2。

大坝　碾压混凝土重力坝，全长 640m，坝顶高程 1424m，最大坝高 160m。

泄水建筑物　由左岸冲沙底孔、右岸泄洪冲沙底孔、右岸溢流表孔组成。设计洪水位为 1418.00m 时泄流能力为 14 700m^3/s；校核洪水位为 1421.07m 时泄流量为 17 653m^3/s。5 孔溢流表孔堰顶高程 1398.00m，孔口尺寸为 13m×20m，校核洪水位时最大泄流量为 14 981m^3/s，采用消力池消能。右岸泄洪冲沙底孔布置在溢流表孔和坝后厂房之间，2 孔尺寸为 5m×8m，设计过流能力 2630m^3/s。右岸设一泄洪冲沙底孔，左岸设一冲沙底孔，均采用挑流消能。

厂房　坝后式，进水口为坝式进水口，进口底板高程

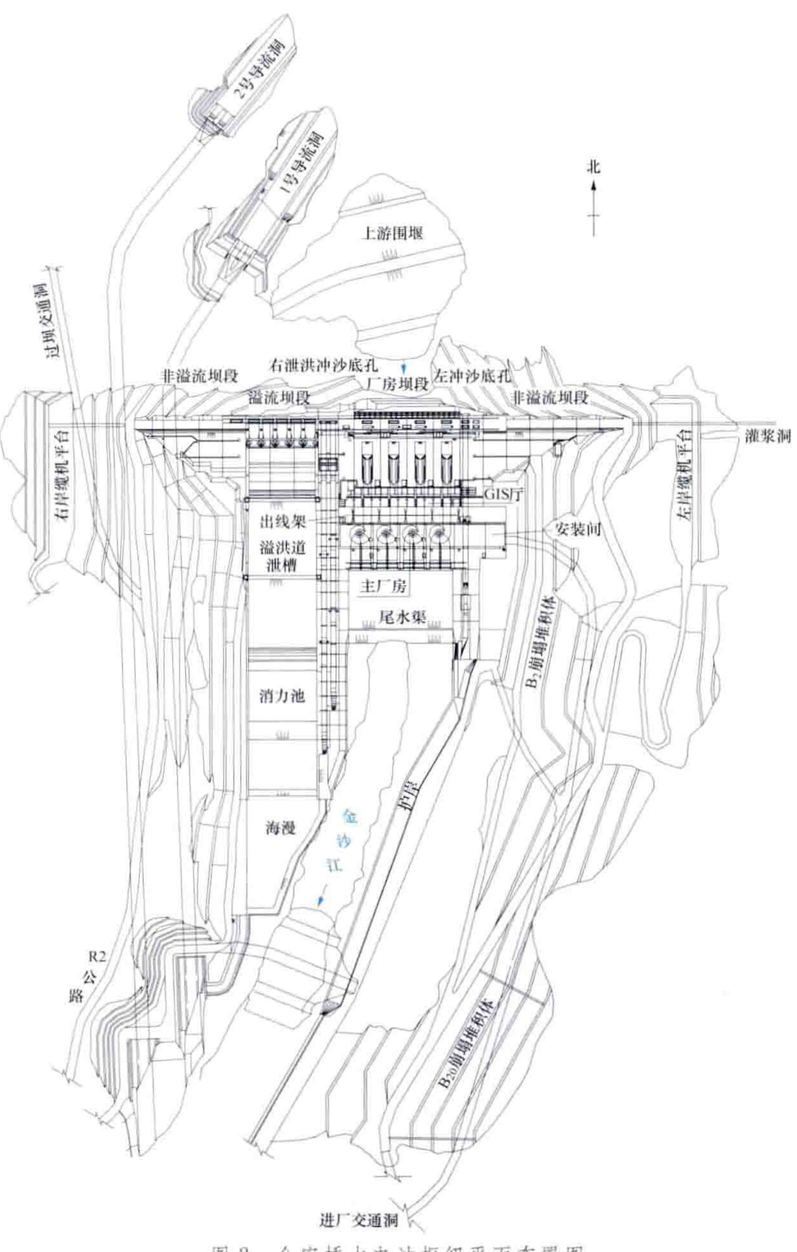
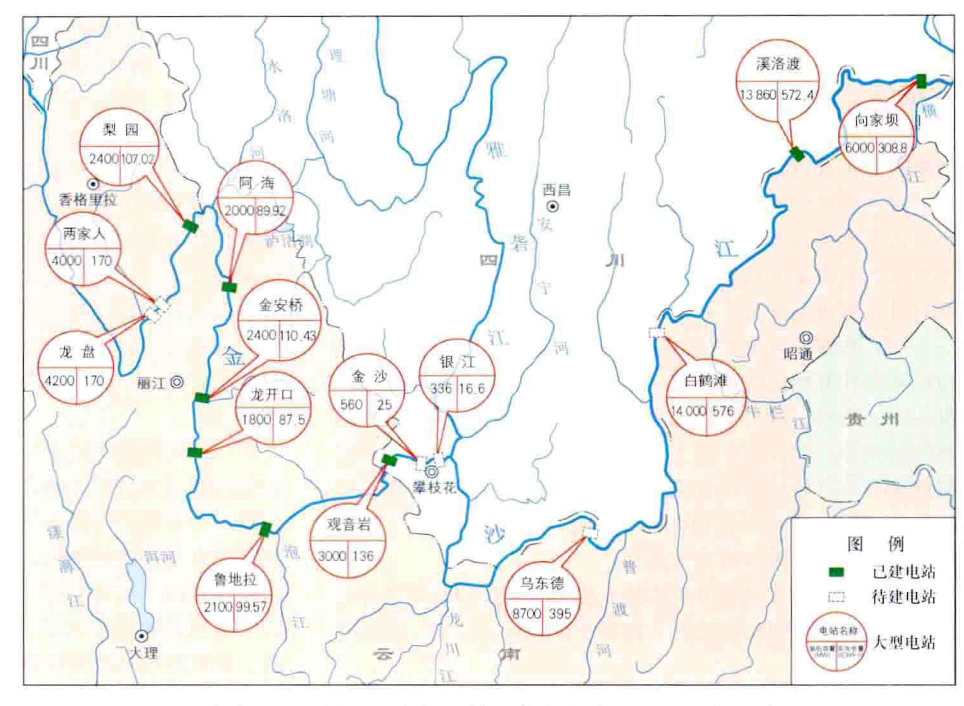


图 2　金安桥水电站枢纽平面布置图

1370.00m；采用单机单管引水形式，管径 10.5m，为钢衬筋混凝土压力半背管，外包 1.5m 厚钢筋混凝土，单机引用流量为 605m³/s。

主厂房尺寸为 215m×34m×76.3m（长×宽×高），内装 4 台单机容量为 600MW 的混流式水轮发电机组。水轮机转轮直径 8.0m，额定转速 93.8r/min，额定出力 612.2MW，最大效率 94.0%，额定工况点效率不低于 91.5%。发电机为半伞式、空冷，额定电压 18kV，额定容量 666.7MV·A，额定功率因数 0.9。水机副厂房布置在下游尾水平台下方，电气副厂房、中控室及 GIS 厅布置在主厂房的上游，厂坝间布置主变压器平台，出线场位于 GIS 楼顶。13 台 500kV 单相双绕组升压变压器组成 4 组，每组容量 300MV·A，1 台备用。1 台 220kV 三相升压变压器，容量 300MV·A。4 台 500kV/220kV 单相双绕组自耦变压器，单台容量 150MV·A，作为系统间的联络，其中 1 台备用。



金沙江（石鼓—宜宾段）梯级水电站布置图及开发现状

工程施工 施工导流采用断流围堰、隧洞全年导流方式。围堰采用复合土工膜心墙堆石围堰。两条导流洞布置于右岸。工程于 2003 年 12 月动工兴建，2005 年 12 月成功实现大江截流，2011 年 3 月 20 日第一台机组投产发电，2012 年 8 月实现 4 台机组全部投产发电。

主要工程量：土石方明挖 1443.3 万 m³，石方洞挖 146.9 万 m³，混凝土和钢筋混凝土 629.62 万 m³，金属结构安装 14 800t。

设计单位 中国水电顾问集团昆明勘测设计研究院。

建设单位 汉能控股集团（原华睿投资集团有限公司）。

Jinsha Jiang (Shigu-Yibin duan) shuidian guihua

金沙江（石鼓—宜宾段）水电规划 [hydropower development planning of Jinsha River (the Shigu-Yibin reach)] 根据长江水利委员会编制的《长江流域综合利用规划简要报告（1990 年修订）》和成都勘测设计研究院 1981 年提出的《金沙江渡口—宜宾段规划报告》，金沙江下游河段分乌东德、白鹤滩、溪洛渡、向家坝 4 级开发。根据 2003 年 1 月原国家计划委员会批复的《金沙江中游河段水电规划报告》（计办基础〔2003〕37 号），金沙江中游河段按“一库八级”开发，即龙盘（虎跳峡）、两家人、梨园、阿海、金安桥、龙开口、鲁地拉、观音岩。2011 年 6 月，国家发展和改革委员会批复了《金沙江攀枝花河段水电规划报告》（发改办能源〔2010〕1313 号）》，金沙江攀枝花河段按金沙、银江两级开发。金沙江石鼓—宜宾河段规划的 14 级水电站，总装机容量 63 105MW，年发电量 2891 亿 kW·h，是中国最大的水电能源基地，见图。

沱沱河、通天河和金沙江均为长江干流河段。沱沱河在最上游，发源于唐古拉山脉，长 358km；与当曲汇合后至青海省玉树直门达之间河段称通天河，长 815km；自玉树直门达到宜宾河段称金沙江，长 2326km，其中玉树直门达至石鼓为金沙江上游河段，石鼓至雅砻江河口为中游河段，雅砻江河口至宜宾岷江河口为下游河段。宜宾以上河段水面落差 5140m，流域面积约 50 万 km²，宜宾处多年平均年径流量 1550 亿 m³。沱沱河还没有编制规划报告，通天河正在开展水电规划工作，金沙江上游干流河段水电规划工作已经完成审查。

开发金沙江水资源的主要任务有发电、供水、防洪、航运、促进地方经济发展等。金沙江梯级水电站除可供给四川、云南、西藏部分电力外，将主要送电至中国缺少能源的华中、华东和南方地区，是“西电东送”的主要能源基地之一。利用梯级水库调节径流有利于金沙江和长江干流防洪，有利于提高长江干流水资源调配能力，有利于改善长江干流通航条件等。

金沙江石鼓—宜宾河段水电站开发建设条件好，工程技术经济指标优越，水库调节性能好（龙盘具有多年调节性能，白鹤滩、溪洛渡具有年调节性能），梯级补偿效益显著，发电量大，供电质量好，防洪作用大。开发建设后，实现“西电东送”，对华中、华东、南方地区经济发展和合理调整中国的能源结构有重大作用。

金沙江中下游河段金安桥水电站已经建成发电，装机规模 2400MW；溪洛渡、向家坝、阿海、鲁地拉、龙开口、观音岩水电站正在建设，装机规模 27 560MW，可在“十二五”期间投产发电；其余水电站正在开展前期勘测设计工作，其中梨园、乌东德、白鹤滩均具备在“十二五”开工的条件。

jinshu jiegou shebei anzhuang

金属结构设备安装 (installation of metal structure and equipment) 将金属结构设备的部件、构件在水电

站设计位置进行组装、连接、固定、调试、试验的施工过程。水电站的金属结构设备通常包括压力钢管、闸门、拦污栅和各种启闭设备及拦污、清污设备等。上述设备除压力钢管多在现场制造外，其余一般在工厂制造后，以部件或构件等形式运至水电站现场。

压力钢管安装　压力钢管的作用是将水电站进水口或压力前池的水引向水轮机，一般由直管、弯管、岔管、伸缩节等组成。多在水电站现场的钢管制作厂制作，检验合格后运至设计位置进行安装。

(1) 直管、弯管是压力钢管的主体部分，一般先从水平段的弯管处开始安装第一节，称始装节。它是后续安装的基准，中心高程、桩号和中心线要严格控制，经检查合格后，再牢固固定，然后自下而上依次逐节（段）进行对装。对装时相邻两节（段）的纵缝应按要求相互错开，安装、焊接并可靠固定后，才可以浇筑混凝土。钢管端部需留出一定长度，以便于下阶段的安装与焊接。

(2) 岔管的作用是分配水流，由于体型比较复杂且焊缝集中，因此岔管制作完成后，经水压试验检验合格，才可运往现场安装。

(3) 伸缩节的作用是补偿钢管因温度变化、基础不均匀沉陷等引起的变位，减小由此而产生的应力。伸缩节有套筒式、压盖限位式和波纹式等，除套筒式可在工地制作外，其余一般均在专业厂制作，安装时通过法兰与钢管连接或与钢管对接焊接。

(4) 明管安装和上述安装方法类似，都是从镇墩处开始，所不同的是它增加了中间支座的安装。中间支座形式很多，主要有滚轮、滑动鞍形和摇摆等型式。支座安装后，应能灵活动作，没有卡阻现象。如系摇摆支座时，还应注意安装时的温度与设计温度的差值，据此算出其伸长或缩短的数值，进行支座位置的调整。

(5) 为了检验钢管的安装与焊接质量，应按要求对焊缝进行无损探伤；整条钢管安装完后，有的要求做整体水压试验。如果电站水头高、管线长，多采用分段试压，以免出现上部已超过试验压力值，下部尚未达到试验压力的现象。

闸门和拦污栅的安装　水电站的闸门和拦污栅一般在制造厂制作、预组装、检验合格后运抵现场安装。除人字闸门外，其余安装方法基本相同，安装项目包括门叶、栅叶和埋件两部分。

(1) 埋件安装。埋件通常先于门叶安装，在预留的二期混凝土槽内先安装底槛，再自下而上安装轨道、门楣等埋件，待其高程、桩号以及相对位置均调整合格后，通过连接筋、板与一期混凝土的锚筋或锚板可靠固定，经检验合格后浇筑二期混凝土。深孔弧形闸门门楣的二期混凝土宜最后浇筑，以便消除弧形闸门的安装偏差。为了适应弧形闸门门叶的安装偏差，出现了先装门叶再装门槽的安装方法。

(2) 门叶与栅叶安装。由于门叶体积一般较大，往往受运输条件的限制而采用分节制造后运抵现场，在门槽内或门槽外拼装焊接成整体。闸门、拦污栅安装好后，需做启闭试验。对多孔共用的检修闸门，还需在各个孔口的门槽内进行启闭试验。

(3) 人字闸门安装。人字闸门埋件分底枢、枕座、顶枢和底坎4部分。埋件的安装方法和其他闸门的埋件基本相同，唯有底坎安装程序和其他闸门不同，其桩号、高程只能暂时定位，待门叶水封装好后，将人字闸门关闭，调整相关位置合格后，再浇筑二期混凝土。门叶安装多在闸门室内进行，首先按底枢位置铺设安装用的临时支座，然后将下节门叶吊放在支座上，调整合格后，再往上顺次吊装其余门叶，直至顶枢安装完成。在整个安装和焊接过程中，要随时检查各部位的偏差和监视焊接变形。待门叶拼装和焊接完成后，拆除临时支座，利用背拉杆调整门叶整体刚度，检查斜接柱的跳动量，浇注支垫块填料，最后联机调试。

启闭机安装　启闭机是闸门的启闭操作设备，最常用的型式有卷扬式、液压式和螺杆式。其中卷扬式又分固定式和移动式。

(1) 固定卷扬式启闭机根据闸门吊点中心线找正两个方向的机架安装桩号，结合孔口中心线和高程将机架定位并固定后，再根据厂内组装记号装配各部件。双吊点启闭机则需注意左右卷筒的同轴度。钢丝绳的长度以动滑轮组吊轴在下极限位置时，留在卷筒上的钢丝绳圈数一般不少于4圈为准。在根据规范要求进行各项试验前，需先完成高度指示器、极限限位装置和负荷控制器的调试及整定。

(2) 移动式启闭机包括门式、半门式、台车式和桥式等，它们都在轨道上行走，具有一机多用的功能。各种机型的安装方法大致相同。以双向门式启闭机为例，一般在安装并验收合格的轨道上进行安装，安装顺序为先组装大车行走机构和下横梁，再吊装门腿、主梁和端梁。等门架构件组装就位并调整其相关的几何尺寸和偏差后，利用螺栓连接成整体，然后吊装小车并安装调整起升机构和电气控制系统。安装完成后需进行静载试验，容量小于2000kN的还需做动载试验。单向移动式启闭机没有小车部分的安装项目，起升机构直接安装在门架主梁上。

(3) 液压启闭机的安装包括泵站设备、液压缸及其支承结构和液压管路3部分。一般需先根据闸门起吊中心线找正安装埋设件和机架等液压缸支承结构件，再安装液压缸、泵站设备和液压管道。活塞杆与闸门吊耳连接后，闸门在全关位或全开位时，液压缸的活塞与上下端盖之间均应留有一定的间隙。液压管路一般根据现场实际情况进行配管后，拆卸进行管接头焊接、酸洗或循环冲洗，直至清洁度达到规范要求，再进行二次安装。泵站安装主要是泵组、油箱、阀组和电气柜的就位、固定和电气接线，相对简单。安装完毕需根据规范要求进行注油、排气、试验及相关阀组、仪表的整定和调试。注入油箱的液压油牌号、清洁度应符合要求。

(4) 螺杆式启闭机多为固定式，故其与闸门起吊中心线、孔口中心线间的偏差控制较严，螺杆应在自由状态与闸门连接。安装完毕需根据要求进行相关试验。

jinshu jiegou shebei ji anzhuang gongcheng touzi

金属结构设备及安装工程投资　(cost of metal structure equipment and installation works)　用于水电站全部金属结构设备购置及安装工程的投资。包括闸门、启闭机、拦污栅、升船机等设备及安装工程投资、压力钢管制作及安装工程投资等。

设备购置投资按设备数量乘设备单价计算。设备单价由设备原价、设备运杂费、运输保险费、采购及保管费等

组成。

安装工程投资按设备数量乘以安装工程单价计算。安装工程单价包括人工费、材料费、施工机械使用费、其他直接费、间接费、利润及税金。

Jinping Erji Shuidianzhan

锦屏二级水电站 (Jinping Ⅱ Hydropower Station)

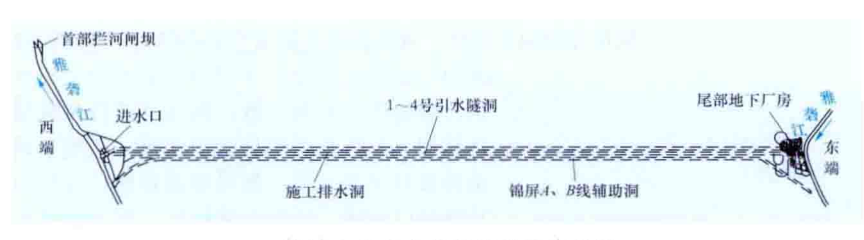
位于中国四川省凉山彝族自治州木里、盐源、冕宁三县交界处的雅砻江干流锦屏大河弯上。电站开发任务为发电，装机容量4800MW，多年平均年发电量242.3亿kW·h。以4回500kV输电线路接入川渝电网，向华东地区供电。

水文和水库特性 坝址以上流域面积10.3万km^2，多年平均流量1220m^3/s。水库正常蓄水位1646.00m，回水长度7.5km，相应库容1401万m^3；死水位1640.00m，死库容905万m^3；调节库容496万m^3。水库本身具有日调节功能，与锦屏一级联合运行同样具有年调节特性。

工程地质条件 坝址区地层为变质砂岩、板岩及第四系覆盖层，引水隧洞沿线穿越的地层为杂谷脑组大理岩、三叠系下统绿泥石片岩、三叠系上统砂板岩、白山组大理岩和盐塘组大理岩，厂区地层为盐塘组大理岩。

枢纽布置 枢纽工程主要由大坝、泄水建筑物、引水发电系统等组成。电站利用雅砻江150km锦屏大河弯的天然落差，通过长约17km的隧洞截弯取直引水发电，为一低闸、长隧洞、大容量引水式电站，见图。

大坝 位于大河弯西端的猫猫滩，距离锦屏一级大坝7.5km，为混凝土重力式大坝，全长165m，最大坝高34m。



锦屏二级水电站枢纽平面布置图

泄水建筑物 泄洪闸为平底宽顶堰形式，共设5个闸孔，每孔净宽13m。堰顶高程1626.00m，闸顶高程1654.00m，弧形钢闸门挡水，弧形闸门尺寸为13m×22m（宽×高）。采用液压启闭机启闭，闸下游设钢筋混凝土护坦和块石海漫防冲消能。大坝右岸利用施工导流洞改建为生态流量泄放洞。

引水发电系统 进水口为独立岸边式进水口，洞外开敞式布置，拦污栅墩前缘总宽145m，闸高43m。引水隧洞共4条，单洞平均洞线长度16.67km，全长采用钢筋混凝土衬砌，其中1、3号引水隧洞采用全断面隧道掘进机（tunnel boring machine，TBM）施工，衬后洞径11.2m，2、4号引水隧洞采用钻爆法施工，衬后洞径11.8m。隧洞一般埋深1500～2000m，最大埋深达2525m，是世界上规模最大的水工隧洞。引水隧洞末端接4座带上室的差动式调压室，大井内径21m，井高148m。高压管道为竖井式布置，单管单机供水，全钢衬设计，衬后直径6.5m。尾水隧洞为单机单洞布置，垂直厂房出流。尾部地下厂房区主要由主、副厂房洞，主变压器洞，母线洞，尾闸洞及附属洞室等组成。主厂房全长352.4m，高72.2m，最大开挖跨度28.30m。

地下厂房内安装8台混流式水轮发电机组，单机容量600MW。水轮机转轮直径6.557m，转速166.7r/min，吸出高度－10.1m。机组额定水头288m，最大工作水头318.8m，最小工作水头279.2m。发电机为空冷半伞式，额定容量667MV·A，额定功率因数0.9，额定电压20kV。变压器为单相强迫油循环水冷铜线圈双绕组无励磁调压升压变压器。发电机-变压器组合方式采用联合单元接线，500kV侧采用4串3/2断路器的接线方式。

工程施工 首部拦河闸坝采用枯水期断流围堰、隧洞导流方式。引水隧洞分别采用钻爆法和全断面掘进机（直径12.4m）开挖方式。工程于2007年1月开工建设，2008年11月截流，2012年12月底首台机组发电，2015年底工程完工。

主要工程量：土石方明挖230万m^3，石方洞挖1337万m^3，混凝土浇筑380万m^3，喷混凝土50万m^3，灌浆555万m，金属结构安装3.8万t。

设计单位 中国水电顾问集团华东勘测设计研究院。

建设单位 二滩水电开发有限责任公司（现雅砻江流域水电开发有限公司）。

Jinping Yiji Shuidianzhan

锦屏一级水电站 (Jinping Ⅰ Hydropower Station)

位于中国四川省凉山彝族自治州盐源县与木里县交界处的雅砻江上，为控制性梯级水库。坝址距成都和重庆直线距离分别为380km和520km。电站以发电为主，并结合汛期蓄水，兼有减轻长江中下游防洪负担的作用，见图1。电站装机容量3600MW，多年平均年发电量166.2亿kW·h，以3回500kV输电线路接入西昌换流站后与下游的锦屏二级和官地水电站共同送电四川、重庆及华东电网，其中送华东为±800kV直流输电线路。通过水库调节可增加下游雅砻江、金沙江和长江三峡、葛洲坝等水电站保证出力2391MW、平枯期电量119.6亿kW·h、多年平均年发电量97.7亿kW·h。水库配合其他措施，可减少长江中下游分洪量，提高防洪能力。



图1 锦屏一级水电站

水文和水库特性 坝址以上流域面积10.26万km^2。多年平均流量1220m^3/s，多年平均年径流量385亿m^3。1000年一遇设计洪水流量13 600m^3/s，相应库水位1880.54m；

5000 年一遇校核洪水流量 15 400m^3/s，相应库水位 1882.60m，总库容 79.9 亿 m^3；正常蓄水位 1880.00m，相应库容 77.7 亿 m^3；死水位 1800.00m，调节库容 49.1 亿 m^3，属年调节水库。

工程地质条件 坝址由中上三叠统杂谷脑组变质岩组成，岩体坚硬、较完整，地震基本烈度Ⅶ度，设计烈度 8 度。

枢纽布置 枢纽工程由大坝、泄水建筑物、引水发电系统等组成，见图 2。

大坝 混凝土双曲拱坝，最大坝高 305m，为世界最高拱坝。坝顶高程 1885.00m，坝顶弧长 552.4m，坝顶宽 16m，最大坝底厚 63m，厚高比 0.207，弧（长）高比 1.81，最大中心角 93.97°。

泄水建筑物 共有 3 套泄洪设施，坝身 4 个表孔，孔口尺寸 11m×12m，堰顶高程 1868.00m；坝身 5 个深孔，孔口尺寸 5m×6m，孔底高程 1789.00～1790.00m；右岸 1 条有压接无压泄洪洞，进口底高程 1830.00m，孔口尺寸 13m×10.5m。

坝身消能设计采用“分层出流、表深孔无碰撞、水垫塘消能”的布置形式，表孔出口为收缩式窄缝形式，深孔压力上翘型并结合下弯型，坝下设水垫塘和二道坝。

引水发电系统 位于右岸。引水系统包括岸塔式进水口、6 条直径为 9m 的压力管道及尾水调压室、2 条断面尺寸为 16.5m×16.5m 的尾水隧洞。地下厂房长 284.8m，宽 25.5m，高 66.7m。厂内安装 6 台单机容量为 600MW 的混流式水轮发电机组，转轮直径 6.6m，额定水头 200m，最大水头 240m，最小水头 153m。水轮机和发电机额定效率分别为 94.3% 和 98.8%。地下主变压器室设 6 台容量为 700MV·A 的 500kV 组合式三相变压器。500kV 开关站采用户外 GIS，布置于主厂房顶部地表。

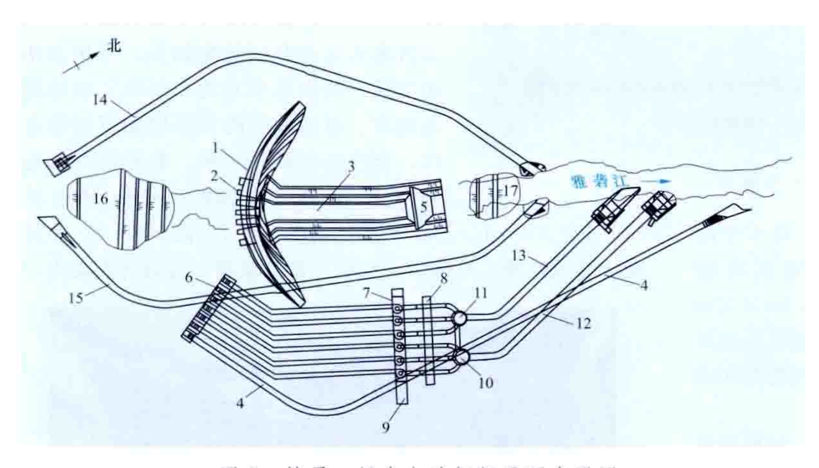


图 2 锦屏一级水电站枢纽平面布置图

1—拱坝；2—坝身泄洪孔口；3—水垫塘；4—泄洪洞；5—二道坝；6—电站进水口；7—厂房；8—主变压器室；9—安装间；10—1 号尾水调压室；11—2 号尾水调压室；12—1 号尾水洞；13—2 号尾水洞；14—左岸导流洞；15—右岸导流洞；16—上游围堰；17—下游围堰

工程施工 导流采用左、右岸导流隧洞和断流土石围堰的全年导流方式。工程于 2005 年 11 月开工，2006 年 12 月截流，2013 年 9 月第一台机组发电，2014 年底全部机组投产发电。

主要工程量：土石方明挖 1424.5 万 m^3，石方洞挖 421.4 万 m^3，混凝土浇筑 840.9 万 m^3，土石方填筑 111.8 万 m^3，帷幕灌浆 109.7 万 m，固结灌浆 152.6 万 m，钢筋、钢材 20.5 万 t，金属结构安装 2.1 万 t。

设计单位 国家电力公司成都勘测设计研究院（现中国水电顾问集团成都勘测设计研究院）。

建设单位 二滩水电开发有限责任公司（现雅砻江流域水电开发有限公司）。

jinshuifa

进水阀 (inlet valve)

在水电站引水系统中，装置在水轮机蜗壳前的阀门。进水阀的主要作用有：为叉管引水的水电站创造机组检修的安全工作条件；停机时减少机组漏水量；防止机组飞逸事故的扩大。进水阀是保护机组和水电站安全的重要设备之一，能承受包括水锤在内的各种水压力和振动；能在动水下紧急关闭，关闭时间应小于机组允许飞逸时间；能在阀前后有一定压差的情况下开启。进水阀通常只有全开或全关两种状态。

进水阀采用的型式主要有闸阀、蝴蝶阀、球阀。相对比较，闸阀尺寸和质量大，一般只用于钢管直径较小的小型机组；蝴蝶阀尺寸和质量小，但水力损失较大，常用于钢管直径大的中、低水头机组；球阀用于钢管直径中等的高水头机组。

进水阀启闭有手动、电动、油压和水压 4 种操作方式。为提高事故关阀的可靠性，蝴蝶阀和球阀常用重锤关闭。

jinshuizha

进水闸 (intake sluice)

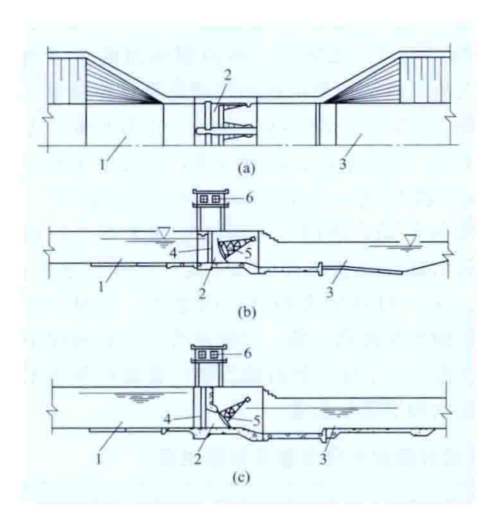
开敞式进水口的取水建筑物。由进口连接段、闸室段和出口连接段 3 部分组成，见下页图。进入引水道的水流由闸室控制，闸室主要包括底板、墩墙和闸顶工作桥。可将闸室分隔成若干个闸孔，其间布置闸墩。各闸孔装设工作闸门及启闭机，检修闸门数量可少于闸孔数，用移动式启闭机周转使用。为防止污物进入引水道，在闸室前沿设置拦污栅。拦污栅可单独设槽，亦可与检修闸门共槽。两侧边墩除与中墩共同支承闸室的上部结构（启闭机工作平台和交通桥）外，还要承受两边的侧向土压力。

布置原则 开启闸门过水时，由于闸孔的束窄作用，过闸水流会发生水面跌落，流速加大，为防止闸后冲刷，在闸后适当范围需进行护底和边坡防护。对于软基上的进水闸，为防止闸基渗透失稳，在闸底板的上游应做好防渗铺盖或在闸底板下做好垂直防渗，以沿长渗径，减小渗透坡降，防止渗透破坏。为防止侧向绕渗破坏，除应做好闸室进出口段、连接段的防护翼墙外，还应在两侧边墩外增设绕渗齿墙，以确保水闸不发生渗透破坏。

为使进出闸的水流平稳而顺畅，在闸室的前后均需设置连接过渡段，在闸前可为导流翼墙，在闸后为渐变段、扭坡扩散段以及护底和海漫等。

当闸前水位变化大时，为控制过闸流量，在工作闸门前常设有带椭圆底曲线的挡水胸墙，或采用弧形闸门局部开启进行调节，对于这种型式的进水闸，尚需在闸后设置消力

池，以免对闸后渠道造成冲刷。



进水闸示意图

(a) 半平面图；(b) 开敞式进水闸纵剖面；
(c) 有胸墙的开敞式进水闸纵剖面
1—进口连接段；2—闸室；3—出口连接段；
4—检修闸门；5—弧形闸门；6—启闭机室

拦污栅 在多污物的河流上，为有效拦截污物，宜设置两道拦污栅槽并有备用拦污栅，以便于清污又不影响发电。拦污栅栅条之间的间距不宜过小，否则将过小的草类污物阻截在拦污栅上，会增加电站的水头损失，甚至压毁拦污栅。拦污栅栅条间距应视水轮机的机型、直径、导叶间距和叶片之间的间距而定，栅条间距以不小于 10cm 为宜，也不宜超过 15～20cm。

拦污漂 对于多污物的河流，可在进水口前方的水域中增设一道具有一定吃水深度的拦污漂，用以拦截漂浮污物，减轻拦污栅的压力。

防冰措施 在寒冷地区的水电枢纽上，多在进水闸的闸室设置排冰道进行排冰，并有多种防冰措施：①可沿建筑物挡水前沿用人工或机械方法破冰，使用冰盖与挡水建筑物脱离接触；②增加水与闸门接触带的温度，如建造保温的闸门启闭机房，或采用通电方法加热金属闸门等；③采用潜水泵将深部温度较高的水抽至冰盖区，使水面温度高于冰点而不致结冰；④将特制的排状通气管道插入水面以下适当深度，通入压缩空气排出气泡强烈扰动水面，使水分子在高速扰动下不结冰。

Jinghong Shuidianzhan

景洪水电站

(Jinghong Hydropower Station) 位于中国澜沧江下游云南省西双版纳傣族自治州首府景洪市上游，距景洪市约 5km。电站开发任务以发电为主，兼顾航运、防洪、旅游、库区水产养殖等综合利用效益，见图 1。电站总装机容量 1750MW，多年平均年发电量 78.58 亿 kW·h，以 500kV 和 220kV 两级电压向南方电网送电。

水库特性 按 500 年一遇洪水 26 500m³/s 设计，5000 年一遇洪水 34 800m³/s 校核。水库正常蓄水位 602.00m，校核洪水位 609.40m，死水位 591.00m；总库容 11.39 亿 m³，其中调节库容 3.09 亿 m³，具有周调节能力。

枢纽布置 枢纽工程由大坝、泄水建筑物、引水发电系统、通航建筑物等组成，见图 2。

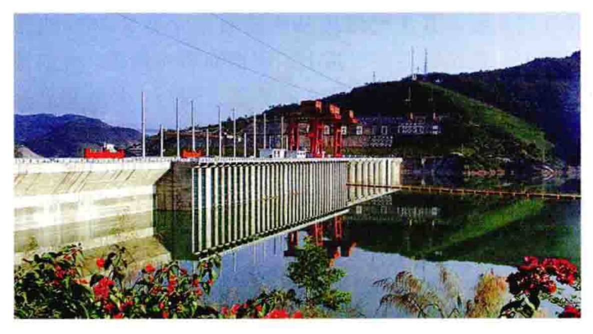


图 1 景洪水电站

大坝 碾压混凝土重力坝，最大坝高 108m，坝顶高程 612.00m，坝顶总长 700.5m。

泄水建筑物 7 孔溢流表孔孔口尺寸为 15m×21m（宽×高），堰顶高程 581.00m，校核洪水条件下，下泄流量为 34 800m³/s。1 号表孔布置在通航坝段右侧与右岸非溢流坝段之间，采用底流消能；2 号表孔布置在通航坝段左侧，当下游水位低于 2 年一遇洪水位（即下游最高通航水位）时，下泄水流泄入下游引航道，以冲刷引航道中的淤沙；3～7 号表孔采用对称 Y 形宽尾墩-消力池联合消能工消能。右冲沙底孔孔口尺寸为 5m×8m（宽×高），左冲沙底孔孔口尺寸为 3m×5m（宽×高），布置在厂房坝段与左岸非溢流坝段之间。

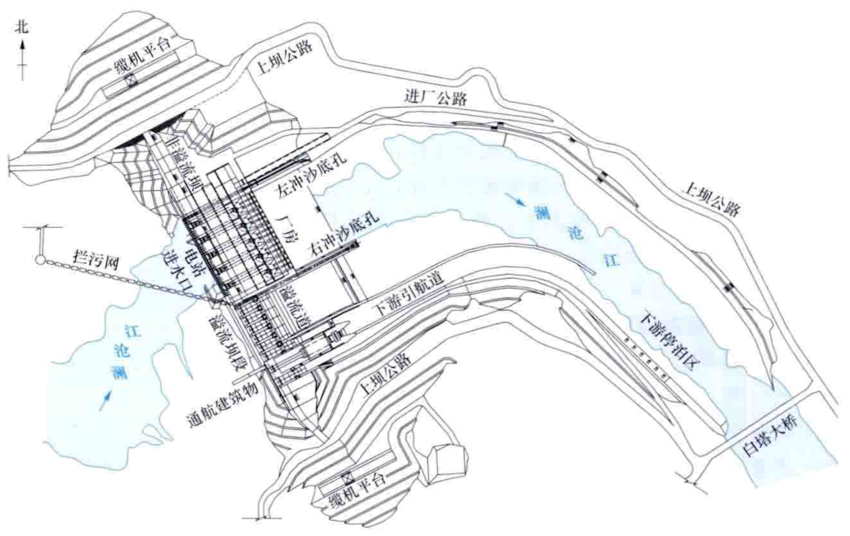


图 2 景洪水电站枢纽平面布置图

引水发电系统 发电厂房为坝后式，布置在左岸厂房坝段之后，采用单机单管供水。压力钢管直径为 11.2m，额定流量 665.56m³/s。主厂房总长 241.78m、宽 31.5m、高 65.45m，安装 5 台单机容量为 350MW 的混流式水轮发电机组。水轮机转轮直径 8.3m，额定功率 357.2MW，额定转速 75r/min，吸出高度 −4.5m。发电机单机额定容量 388.9MV·A，额定功率因数 0.9，额定电压 18kV。500kV 和 220kV 变电站布置在厂坝之间、上游副厂房顶部平台上，均采用 GIS 开关设备，主变压器布置于 GIS 楼上游侧。

通航建筑物 按Ⅴ级航道、300t 级船型的标准设计通

航过坝建筑物，其土建结构及承船厢尺寸满足500t级单船过坝能力。建筑物主要包括上、下游靠船建筑物，导航建筑物及升船机主体建筑物。水力式垂直升船机，最大提升高度67.2m，最大过坝船300t，设计年通过能力135.8万t。

工程施工 采用分期导流方式，一期河床过流，二期坝体缺口和导流底孔过流，后期左、右冲沙底孔和表孔过流。工程于2003年7月开工，2008年6月第一台机组发电，2009年8月最后一台机组投产发电。

主要工程量：土石方明挖1502万m^3，土石填方222万m^3，混凝土浇筑396万m^3，钢筋、钢材4.37万t，金属结构安装2万t。

设计单位 中国水电顾问集团昆明勘测设计研究院。

建设单位 华能澜沧江水电有限公司。

jingliu

径流

（runoff） 降水到达地面后从地面和地下汇入河道、湖泊或海洋的水流。包括地面径流、渗入地表后沿着土壤表层相对不透水层界面流向河道的表层流（也称壤中流）和从地下排入河道的地下径流。习惯上把地面径流和表层流合并称地表径流，把完全由地下水构成的径流称作基流。径流量是指在一定时段内流过河道某一断面的总水量，如汛期径流量、枯季径流量、年径流量等。年径流量则是评价河流水资源和水能资源的重要定量特征。广义的径流还包括固体径流（含沙量）和化学径流（含盐量）等。径流是水循环的重要环节。按径流成因可分为降雨径流和冰雪融水径流两类。降雨径流由降雨形成，经过植物截留、下渗、填洼、流域蒸散发、坡地和河网汇流等过程，最后汇集到流域出口断面。冰雪融水径流由冰雪融水形成，先要有一定的热量条件，使冰雪融化为液态水。如在冰雪融化期间遇到降雨，则形成雨雪混合径流。

影响径流的因素 有气候因素（降水、辐射、气温、风速等）、自然地理因素（流域面积、河道坡度、地质、地貌、植被、土壤等）、人类活动（土壤利用、农林措施、水利水电工程）等，其中以气候因素影响为主。根据水量平衡原理，河流的径流总量等于流域内的降水总量减去蒸散发损失、渗漏损失和流域蓄水变化量。影响径流的气候因素在地区上有一定的分布规律，还具有明显的年内、年际的周期性变化，所以世界各地区的径流也相应地存在着地区性和周期性变化的特点。自然地理因素对径流量及产流汇流有一定影响。同样的气候条件，流域面积越大，径流量越大；地质、土壤条件不同，地面径流、壤中流和地下径流占总径流量的比例也不同。人类活动可以改变径流量及年内、年际分配。大型灌区引水减少了下游河道径流量，年、季调节或多年调节水库可改善径流年内或年际分配。

地区分布 多年平均年径流量（亿m^3）或多年平均流量（m^3/s）是河流重要的水文特征值。它也常用年径流深（单位集水面积年径流量折算的平均水层深度，以mm计）或年径流模数［单位集水面积上所产生的年平均流量，以$L/(s \cdot km^2)$计］表示，以便在河流之间进行比较。世界部分国家年径流量及年径流深见表。中国境内年径流深的分布趋势同年降水量的分布基本一致，由东南沿海向西北内陆递减，但其不均匀性比降水量更为严重。全国按径流深的多少可以划分为丰水带、多水带、过渡带、少水带、缺水带等5个明显不同的地带。①丰水带：年径流深大于800mm，包括华东和华南沿海、台湾、海南、云南西部和西藏东南地区，年径流深最大值在台湾中央山地和西藏东南雅鲁藏布江下游靠近中印边境一带，达2000～4000mm。②多水带：年径流深200～800mm，位于秦岭、淮河以南，长江中下游以及云贵、四川和广西地区。③过渡带：年径流深50～200mm，包括黄淮海平原，陕西、山西和东北大部，四川西北和西藏东部和南部以及新疆天山部分山区。④少水带：年径流深10～50mm，包括东北西部，内蒙古、宁夏、甘肃、青海大部，新疆的西部和北部。⑤缺水带：年径流深小于10mm，包括内蒙古、宁夏、甘肃的沙漠，青海的柴达木盆地，新疆的塔里木和准噶尔盆地。

世界部分国家年径流量及年径流深

国　名	面　积（km^2）	平均年径流量（亿m^3）	平均年径流深（mm）
中　国	9 596 960	27 115	282.5
日　本	377 710	4494	1189.8
印　度	3 287 590	17 800	541.4
德　国	356 760	1787（外来820）	500.9
英　国	244 820	1590	649.4
法　国	547 030	1800	329.0
意大利	301 230	1550	514.5
埃　及	1 051 450	555	52.8
阿尔及利亚	2 381 740	150	6.29
扎伊尔	2 345 910	10 190	434.4
澳大利亚	7 686 850	4400	57.2
新西兰	268 680	3970	1477.6
加拿大	9 976 140	22 674.9	227.3
美　国	9 372 610	29 702	316.9
巴　西	8 511 970	51 912	609.8
阿根廷	2 766 890	9140	330.3

年内分配 受纬度、地形及大气环流的影响，世界各地都有不同的丰水和枯水季节。地中海沿岸地区冬季多雨丰水，夏季干旱枯水。温带阔叶林区及热带雨林区，全年降雨比较均匀，无明显丰水期和枯水期。中国属于温带季风气候区，具有夏季丰水、冬季枯水、春秋过渡的特点。径流的季节分配主要取决于河流的补给条件。以雨水补给的河流，季节性变化剧烈，汛期河水暴涨，容易泛滥成灾，枯季水量很小，水源往往不足，丰枯期变化较大。以冰雪融水补给为主的河流，由于流域内热量的变化比雨量的变化小，年内分配较为均匀，丰枯期变化较小。雨水和季节性冰雪融水补给的河流，每年有春、夏两次汛期。地下水的补给比重各地相差很大，一般河流占年水量的20%～30%，最高达60%～70%，最少不足10%。青藏高原以及黔、桂岩溶（喀斯特）分布区地下水的补给较大，径流年内分配比较均匀。大江大河因承受不同地区径流的汇注，地下径流的补给又受到河网湖泊的调蓄作用，径流年内分配也比较均匀。

年际变化 水量丰沛地区，丰枯水年水量相差较小；水量贫乏地区，丰枯水年水量相差较大。以历年最大和最小年

径流量对比，中国长江以南各河流和松花江一般都小于3倍；淮河、海河各支流可高达10～20倍，部分平原河流相差更大。有的河流还存在着连续枯水年和连续丰水年交替出现的情况。例如黄河在60年期间，曾经出现过连续11年（1922～1932年）的枯水期，这个时期的平均值比多年平均值少24%；也出现过连续9年（1943～1951年）丰水期，这个时期的平均值比多年平均值多19%。

参考书目

沈冰，黄红虎．水文学原理．北京：中国水利水电出版社，2008.

水利电力部水文局．中国水资源评价．北京：水利电力出版社，1987.

jingliu jisuan

径流计算 (runoff computation)

对径流的多年变化和径流年内分配的规律进行定量的分析计算，预估未来径流的情势变化。为水利水电、桥涵、航运等工程及水资源综合利用的规划、设计、施工和管理运营提供径流数据。径流可用流量、径流总量、径流深、径流模数等表示。径流按水源可划分为地面径流、地下径流和壤中流；按降水形式和补给来源可划分为降雨径流和融雪径流；按丰枯变化规律可划分为根据年径流量及其年内各月或汛期、非汛期径流量大小的丰、中、枯或特丰、丰、中、枯、特枯等类型。中国径流分布和降水量分布一样，总的趋势由南向北和由东向西递减；新疆、甘肃交界以西，则由西向东递减，具有明显的地域性分布规律。同时，由于中国地形错综复杂，加上下垫面条件的差异，使得径流的分布更为复杂，呈现多种非地域性变化。

径流计算的主要内容包括设计年径流计算、枯水径流计算等。设计年径流是衡量水资源利用工程规模和确定水资源利用程度的重要指标；枯水径流是制约城市发展规模、灌溉面积、通航容量和时间，以及确定水电站保证出力的重要因素。

设计年径流计算　分析设计断面年径流的年际变化及年径流在年内的分配规律，提出相应于设计标准的年径流量及径流系列。计算内容包括多年平均年径流量和符合指定设计保证率的年径流量及径流系列。（见设计年径流）

枯水径流计算　统计分析设计断面的径流系列，提出相应于设计标准的最小流量、最小日平均流量和最枯时段径流量及其时程分配等成果。根据设计断面所在地点的资料条件，枯水径流计算采用不同的计算方法。

（1）有充分的实测水文资料时的枯水径流计算。当有30年以上实测或插补延长径流资料时，可采用频率计算法推求。选样采用按给定设计时段，按年最小选样原则进行。枯水径流系列的插补延长可采用水位流量关系、上下游或邻近相似流域参证站与设计依据站的流量相关等方法。枯水径流的还原可采用分项调查、退水曲线、长短时段或上下游枯水径流量相关等方法。枯水径流采用不足概率q，即以不大于该径流的概率来表示，它和年最大值的频率P有$q=1-P$的关系，系列排队时按由小到大排列。枯水径流的频率曲线常采用P-Ⅲ型频率曲线适线，用P-Ⅲ型频率曲线配线不佳时也可采用经验频率曲线或其他线型。在工程地点有历史文献、文物和调查资料时，要尽可能通过历史调查资料以延长资料系列。系列中有零值项时，可采用包含零值项的直接计算法、间接计算法和经验法等方法进行频率计算。

（2）短缺水文资料时的枯水径流估算。当设计完全没有径流资料或资料较短无法插补延长时，可采用经验公式法、等值线图法和水文比拟法等方法推求。

径流计算还要考虑位于冰雪融水补给地区和岩溶地区等因素的影响。冰雪融水对径流有明显的调节作用，冰雪融水径流占较大比重时，径流受气温变化影响有明显的日周期变化。岩溶地区一般地下水系比较发育，地表分水线和地下分水线不吻合，地表水和地下水相互交换，与闭合流域相比，径流系数和径流年内分配差异明显。

jingliushi shuidianzhan

径流式水电站 (runoff type hydropower station)

不调节径流，按来水流量发电的水电站。当来水流量大于电站水轮机过水能力时，水电站满出力运行，多余的水量，直接经泄水建筑物泄向下游，称为弃水；当来水较少时，全部来水通过机组发电，在来水流量小于水轮机过水能力时，有部分装机容量因缺水而不能被利用。水电站这种运行方式称为径流式发电。与径流式水电站相对应的是调节式水电站，其运行方式是用水库调节径流，根据用电要求发电：来水多于需要时，水库蓄水；不足时，水库补水。调节式水电站有多年调节、年（季）调节、周调节、日调节等（见径流调节）。其中，日调节水电站一般只在枯水季进行日调节，在丰水期常采用径流式发电，所以有人认为日调节水电站也属径流式水电站。径流式水电站中有高水头或低水头的引水式水电站，也有低水头的坝式水电站。

径流式水电站不调节径流的原因有两个方面：①水库不具备相应的调节库容，没有能力调节；②虽有一定库容，但受综合利用要求制约而不调节径流。如长江上的葛洲坝水利枢纽，其水库总库容15.8亿m^3，在枯水期本可进行日调节，但为适应下游航运要求而不调节径流。当上游长江三峡水利枢纽建成运行后，葛洲坝将不再作径流发电运行而承担反调节任务，即把三峡因调峰运行而放出的24h不均匀流量反调节成较均匀的流量出库，以适应下游航运要求。

当电力系统调峰能力不足时，径流式水电站也可参与调峰。即在负荷高峰时利用全部流量发电或按机组可发出的最大功率运行；在负荷低谷时相对减少发电功率，致使部分流量不通过机组发电而弃水出库。这种运行方式称为弃水调峰，由于弃水而未被利用的电量称为调峰弃水电量。

径流式水电站运行特点：①24h内发电功率由入库径流情况而定，适宜担负电力系统的基荷；②若上游没有水库调节，则其年内各月电量变化大，枯水期电量明显少于丰水期，为此使系统内火电厂或其他电站要在丰水期少发电，枯水期多发电，降低系统电源装机容量利用率；③弃水多，径流式水电站的水量利用系数一般较低，当上游有调节水库时，弃水会不同程度地减少；④坝式低水头径流式水电站的机组在丰水期常因下游水位升高而发不足额定出力（见水电站额定水头），甚至不能发电。

jingliu tiaojie

径流调节 (runoff regulation)

利用水库或湖泊（天然水库），按发电、防洪和其他综合利用水资源的要求，

改变河川径流时空分布。水电站水库的径流调节，在改变河川径流的时空分布时，也同时改变水能的时空分布。河川水流的丰枯周期变化及其随机性，常不能适应发电、防洪等水资源综合利用的要求，需要进行径流的时空再分布。径流调节的基本途径是利用水库的容积和泄流设施储存和泄放水量，通过调节周期的水量平衡，进行水库运行的决策，从而改变径流及水能的时空分布，达到合理地满足发电、防洪等水资源综合利用的目的。经过水库调节以后，能较好地适应水资源合理利用的流量，叫做调节流量。

种类和要求 根据服务对象不同，径流调节可分为发电径流调节、洪水调节和为其他综合利用进行的径流调节。不同的服务对象，对径流调节提出了不同的要求。

发电径流调节 河川天然径流在年季间变化较大，在一天内则较稳定。电力用户的用电特性则相反，在年季间变化相对较小，在一天内变化较大。发电径流调节是利用水库把某些时期相对多余的来水量蓄存起来，在相对缺水时补给用以发电，以适应电力系统的需求。发电径流调节计算又叫做水能计算。

洪水调节 水库为下游防洪，在汛期拦蓄洪峰，当出现与下游防洪区防洪标准相应的洪水时，使下泄流量与区间流量（当有支流加入时）汇合后不大于下游防洪区的安全泄量，以减免下游洪灾；根据库区防护对象的防洪要求，控制水库水位和下泄流量，以减免库区淹没；当出现较稀遇的洪水时，加大泄量，以保证建筑物的安全。

其他综合利用径流调节 包括：①航运要求库内或下游河道在通航季节维持一定的水位以保持航深，并要求流速和水位变化不大于某一限度，对重要的航运河段，还要进行明渠不恒定流计算。②灌溉要求合适的取水高程，并在农作物需灌水季节（旱季）放水灌溉。③供水（主要是城镇工业和居民生活用水）要求一年各季均匀供水，并有较高的水质要求。④环境保护、渔业及旅游等主要是对流量、水位和水深的要求。（见综合利用水库径流调节）

综合利用的各用水部门均有各自的保证率要求，一般以城镇供水保证率要求最高，发电、航运次之，灌溉及其他部门较低。

水电站径流调节的特点 主要包括协调流量和水头、协调调节库容两个方面。

（1）协调流量和水头。水能的要素为流量和水头。在径流调节过程中，水库的充蓄和消落直接导致库水位的变化，水库长期维持高水位，固然可取得较大的水头，但由于未充分利用库容调节径流，增加枯水期的调节流量，对增加保证出力和年发电量都不利；相反，若水库水位过度消落，虽常可取得较大的枯水期调节流量，但由于低库水位导致水头的降低，也可能使保证出力和发电量减少。因此，水电站径流调节必须全面照顾调节流量和水头的利用，进行有利的决策。

（2）协调调节库容。水电站的水库即能库。水库消落，获得调节库容（或称兴利库容、有效库容）而增加的调节流量与本电站及其下游梯级电站利用的总水头而形成的能量，叫做水库蓄能。水库蓄能可较全面地体现水电站水库的调节作用。在考虑河流梯级开发方案时，应尽量将水库布置在上游，以取得较大的控制水头，增加水库蓄能，从而增加调节能力；当水电站开发方式及水库容积已定时，水电站径流调节的任务就是最有利地利用其蓄能，以取得最大的发电效益。

水库调节性能 水库对天然入库径流进行调配调节的能力，水库调节周期为水库从库满到放空再蓄满（或从库空蓄满再放空）所需的时间。按调节周期长短，水库调节性能（不含洪水调节）可分为无调节、日调节、周调节、年调节（包括不完全年调节或季调节）和多年调节5类。在径流特性相同的情况下，调节周期越长，需要的调节库容越大，发电效益也越大。具有较长周期调节性能的水库也同时具有较短周期调节的性能。

水库的调节性能常以库容系数β来表达，β为调节库容与水库平均年径流量的比值，β值越大，调节性能越好；水电站的调节性能也可以用水库蓄能与水库平均年来水能量的比值（含下游梯级）来表达。

无调节 水电站对天然径流无调节能力。如果水电站没有水库或虽有水库但库容过小，不能将天然来水重新分配，就是无调节水电站，也称径流式水电站。

日调节 水库的调节库容仅能将一天的来水量重新分配，将低负荷时多余的水蓄起来，在高负荷时用，调节周期为一天。

周调节 水库的调节库容可将一周的来水量重新分配，除进行日调节外，还可在每周将用电负荷降低时（如周末双休日）多余的水蓄起来，增加在高负荷时（如工作日）的发电流量，调节周期为一周。

年（季）调节 在每一年中蓄存丰水期多余的水量供枯水期用，以提高枯水期的出力，其调节周期为季或年。在设计枯水年可蓄存丰水期全部多余的水量，供枯水期用，全年不发生弃水的年调节称为完全年调节；如果水库仅能蓄存丰水期部分多余的水量，汛期有弃水，则为不完全年调节或季调节。

多年调节 能将若干丰水年的多余水量蓄存起来供枯水年或若干连续枯水年使用，调节周期在一年以上。

径流调节计算 径流调节计算的任务和目的，是在满足各项约束条件的前提下，为最大限度地满足发电、防洪及其他综合利用的要求，在调节周期内进行水量及能量平衡计算，从而进行水库运行的决策，并模拟水库未来运用情况，计算出调节效益指标及水库运行特性，作为规划、设计的基础，为水库建成后的运行作参考。径流调节的基本依据是河川的径流资料，而河川径流具有周期性、随机性和不重复性。按对径流过程的处理方法不同，径流调节计算方法可分为时历法、数理统计法和随机过程法3类。

时历法 以径流的周期性为基础，按确定型（即历史径流重演）的假定来处理径流资料。用实测（有时还加插补延长）径流系列作为基础资料，进行逐时段的调节计算。其优点是简单、直观，且易于进行各种复杂情况（如综合利用、水库群补偿等）的调节计算，可求得出力、水头、库水位和调节流量的过程线，在规划设计中应用较广泛；缺点是当实测径流的年限较短时，影响计算成果的代表性。（见时历法径流调节）

数理统计法 用实测的径流系列资料（当实测径流资料短缺时，可借用邻近河流的径流统计参数），求出年平均流

量的多年统计参数（均值、离差系数、偏差系数和年际的相关系数，见水文频率分析），并利用这些参数进行概率组合演算，求得调节流量。数理统计法多用于多年调节水库。其优点是能较好地反映径流的随机性，并可在一定程度上解决实测径流资料短缺的问题。缺点是难以求得出力、水头、库水位和调节流量的过程特性，对综合利用、跨流域补偿调节计算，无论在理论上还是方法上均存在较大的困难；此外，把连续的径流过程作为孤立的随机变量对待也存在一定的缺陷。（见数理统计法径流调节）

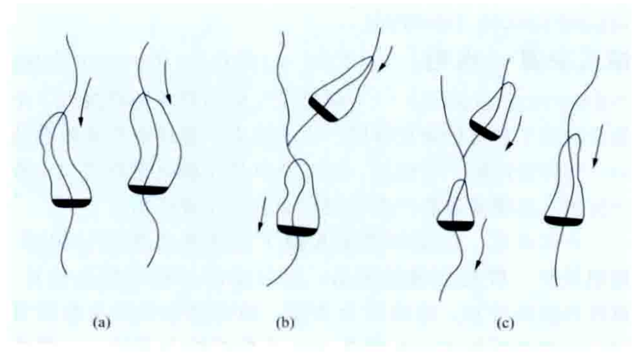
随机过程法　采用随机的方法对径流过程进行处理，然后进行径流调节计算，有马尔科夫链法和径流系列人工生成法。马尔科夫链法是根据实测径流系列资料，求得本时段径流的概率分布，并根据与前若干时段径流的相关系数，建立起本时段与前若干时段径流的条件概率，据此建立起联合概率分布，从而得到本时段径流的无条件概率分布，据以进行径流调节的演算。一般常用马尔科夫单链来描述径流（仅建立与前一时段的径流相关关系），并用动态规划作马尔科夫决策，进行径流调节，较广泛地用于已建成电站的水库优化调度。径流系列人工生成法是对实测径流系列进行数理统计，求得其统计参数，再用随机模拟的方法［如蒙特卡罗（Monte Carlo）法］生成年限很长的人工径流系列（如500～1000年或更长），然后用时历法做径流调节计算。随机过程在理论上较严密，但计算工作量很大，需要很大的计算机内存空间和很长的机时。对水库群补偿调节，涉及多维概率模型，理论和方法还不成熟，仍处于探索阶段。（见水电站水库优化调度）

水电站群的径流调节　水电站群有无水力联系、有水力联系和混合式3种类型。

（1）无水力联系。各水电站不在一条河上，即跨流域水电站群，见图（a）。

（2）有水力联系。水电站梯级，上游电站下泄的流量流入下游梯级电站，见图（b）。

（3）混合式。兼有上述两种类型的水电站群，见图（c）。



水电站群简图

（a）无水力联系；（b）有水力联系；（c）混合式

水电站群的联合运行，具有“群”的增益，这种增益来自水文补偿和水库补偿。水文补偿是指电站间的水文不同步性（即各电站在同一时间，流量丰枯的程度不同）而引起的自然补偿作用，与水库运行无关，跨流域水电站群，可能有此类效益。水库补偿是指水库群的径流调节，以电站间按出力或流量的余缺调剂的方式运行，以综合出力满足系统的电力电量的需求，这种调节叫做补偿调节。以出力的余缺进行调剂的叫做电力补偿调节，用于有电力联系的水电站群；以径流的余缺进行调剂的叫做径流补偿调节，用于有水力联系（水电站梯级）的电站群。

水电站群的径流调节，必须以水电站群总发电效益最大为原则，制订各电站的运行方式，进行水量和能量的平衡。（见水库群补偿径流调节）

反调节　当上游水库按某用户的用水要求进行调节时，因不能适应下游其他用户的需要而需进行的径流重新调节。如发电日调节造成下游日内不均匀流量，影响下游通航或灌溉、供水等，而需用水库将不均匀来水调匀，以适应下游有关用户的要求。

jingkurong

静库容

（still storage capacity）　见动库容。

jingtai touzi（shuidian）

静态投资（水电）

（static investment of hydropower project）　按照国家法律、条例、行业制度和市场行情，以规范的计价方法，采集某一时期（一般以某年某月）价格水平所计算出的项目投资，是工程总投资的一部分。水电站工程静态投资由枢纽工程投资、建设征地移民安置补偿费用、独立费用和基本预备费组成。其中基本预备费指用以解决前期设计范围以内的设计变更（含工程量变化、设备改型、材料代用等），预防自然灾害采取的措施，以及弥补一般自然灾害所造成损失中工程保险未能补偿部分而预留的费用。

judi qihou yingxiang

局地气候影响

（impact on local climate）　水库蓄水后，尤其是大型水库，由于水面增大、水体加深，水库的水体面积、容积和形状发生变化，导致该地域水陆间的水热条件及地气间的水汽和热量的输送交换，以及空气动力学特征等发生变化，从而产生的局地气候效应。水库对库区及周围地区小气候的影响，有利于农业生态改善。平均气温升高，积温增加，有利于经济植物生长。在狮子滩、东江、丹江口等水库周围，由于冬季气温升高，促进了茶叶、柑橘等经济作物种植的发展。

为了研究和预测水库对局地气候的影响，水电工程在建设和运行中开展了大量的观测和分析工作。在中国东江水电站开展了长期定位观测，在狮子滩水电站、龙羊峡水电站、五强溪水电站等进行实地考察，建立数学模型进行预测计算。预测分析和实地观测表明，水库对局地气候的影响主要体现在气温、湿度、降水、风几个方面。

气温　水库对周围地区气温的影响一般冬季大于夏季，年平均气温略有上升，库周地区夏季气温有所降低，冬季气温有所上升，不同月份气温变化幅度有所差异。气温的变化随工程规模、所处地理位置不同，影响程度有较大差异。据统计，年平均气温上升幅度为0.1～0.5℃，夏季气温下降幅度一般在0.1～1℃之间，冬季气温上升幅度在0.2～1.2℃之间。气温变化的范围为1～2km，影响高度在200m左右。

湿度　水库建成后，水面增大，总蒸发量增加。气流由

水面到陆面，导致绝对湿度增加，离水体越近，湿度越大。在库周形成最大相对湿度带。但随着海拔的增加，湿度增加逐渐减弱。年平均相对湿度变化在5%左右。

降水　流域大尺度降水主要受大气环流控制，由于水库水域面积加大、蒸发量增加的降水量在总降水量中所占比重很小。据统计，水库对降水的影响主要是在水库及周围降水量减少，距库岸8～10km降水开始增加。降水影响变化幅度一般在10%以下。

风　水库形成后，水面比陆地下垫面平滑。当气流吹过水面时，库面风速会增大。下风岸风速增加更明显。

juejinji kaiwa

掘进机开挖　(excavation by tunnel boring machine)

在地下或山体的岩石、土层中用掘进机进行圆形隧洞开挖的施工技术。全断面隧道掘进机（tunnel boring machine，TBM）是一种具有破碎岩石或黏土、出渣、拼装隧道衬砌、测量导向纠偏等综合性功能的隧洞掘进设备，如图所示。与钻孔爆破法相比，掘进机开挖具有掘进速度高、对围岩扰动少、围岩松散区厚度相对减小、洞壁平整度较高和操作安全等优点。但掘进机前期投入高，而且一台掘进机械一般只适用一种直径的圆形断面，也不能适应多变的地质构造。根据掘进机的制造水平及经济性，洞长超过3km或600倍洞径，直线或弯道半径大于200m时较为适用。

锦屏二级水电站全断面隧道掘进机（TBM）

工作原理　掘进机开挖隧道时，不用钻孔爆破法破碎岩石，而是靠掘进机自备的液压支撑将机身支撑在洞壁上，然后推进机构施加推力将旋转刀盘上的盘形滚刀楔入开挖面，切割破碎剥落岩体，同时刀盘上的装渣铲斗将剥落的岩屑卸入出渣的带式输送机，再由带式输送机转卸入运输工具运出洞外。在松软地层中使用掘进机时需配置防护盾构。盾构是用钢构件制成的盾和构架，既可用以掘进，又可用以安装支护砌块，并起到保护作用。现代盾构的前部为装置开挖设备的切口金属环，中部为装置推进设备的支承环，尾部为保护砌块安装的钢盾。施工时在前部开挖地层，同时尾部拼装预制混凝土砌块支护，然后用千斤顶顶住已拼装好的砌块支护将盾构推进，如此循环交替，逐步掘进。

分类　按掘进机适用条件的不同，掘进机分为硬岩掘进机和软岩掘进机两大类。硬岩掘进机通常用于稳定性良好、中至厚埋深、中至高强度的岩层中掘进长隧道，包括主梁式（撑靴式）掘进机、单护盾掘进机及双护盾掘进机，多用于水利水电、交通工程中。软岩掘进机（又名盾构机）通常用于基本均质的软弱地层中，包括土压平衡式盾构机、泥水式盾构机及混合式盾构机，多用于市政工程（地下管道、地铁）、过河隧道工程中。

施工方法　在掘进机工作前，洞口要有适当平坦的场地组装设备，先用钻孔爆破法挖出一段隧洞，浇筑混凝土底板和两侧边墙，也可不挖隧洞在洞口直接浇筑混凝土侧墙，长度大于掘进机刀盘到支撑靴板后缘的距离，以支承掘进机的支撑靴板，然后修平工作面，掘进机方能就位工作。

隧洞掘进机开挖采用无轨运输或有轨运输出渣方式：①无轨运输。包括带式输送机直接出渣及汽车出渣两种形式。汽车出渣时需在隧洞底部用石渣铺垫车道，将带式输送机卸落的石渣用自卸汽车输出洞外，适用于洞径较大的隧洞。②有轨运输。在隧道洞底部铺设铁道，将带式输送机卸落的石渣用电机车牵引矿车输出洞外，适用于纵坡较小的中、小隧洞。

发展概况　隧洞掘进机自1947年美国试制连续式双钻头煤矿掘进机开始，1953年首次制成全断面开挖的圆形隧洞掘进机，经逐年改进发展成为专用的隧洞掘进机。20世纪60年代，中国开始研制、生产及使用掘进机，进入90年代后掘进机得以广泛应用，“引大入秦”工程的30A隧洞（水磨沟隧洞）采用双护盾全断面隧道掘进机（直径5.54m）开挖，独头月平均进尺达1095m，最高月进尺达1300m。南水北调穿黄工程隧洞段长4250m，双洞平行布置，隧洞轴线间距25m，双洞经过的主要地层为粉质壤土、砂层及砂砾石层，地质条件复杂，采用泥水加压平衡盾构机（直径8.7m）开挖隧洞。锦屏二级水电站引水隧洞长16.7km，最大埋深2525m，地应力高，存在地下涌、突水，其中1、3号引水洞东端采用硬岩掘进机（直径12.4m）开挖，最高月进尺达682.9m。由于高地应力产生极强岩爆的原因，单条洞实际采用掘进机掘进的长度为5862、6295m。

jungong juesuan (shuidian)

竣工决算（水电）　(final settlement for completed hydropower project)

项目完工后的财务总结报告。全面反映竣工项目的建设时间、生产能力、建设资金来源和使用、交付使用财产等情况。竣工决算是正确核定新增固定资产价值，办理固定资产交付使用手续的主要依据。

决算内容　由编制说明和竣工决算报表两部分组成。编制说明一般包括编制依据，项目建设过程中勘察设计、概算和投资计划、建设资金来源、物资设备和财务管理等的执行和变更情况，各项技术经济指标的完成情况，投资效果的分析和评价，主要经验教训，有关竣工决算报表的说明，存在问题和处理意见等。竣工决算报表一般包括：①工程概况表。反映项目规模、特征、工期、投资及造价、主要技术经济指标、工料消耗、水库淹没补偿指标等情况。②决算一览表。反映项目投资、造价以及交付使用财产总值等情况。③预计未完工程明细表。反映未完项目及其数量、投资、负责单位等情况。④其他工程和费用核销明细表。反映列入概算的其他工程和费用部分及不列入投

资构成的应核销其他支出的各项费用情况。⑤移交固定资产明细表。反映移交其他单位的固定资产详细内容。⑥交付使用财产总表。反映交付使用的固定资产和流动资产的全部情况。⑦交付使用财产明细表。反映交付使用固定资产和流动资产的详细内容。⑧竣工工程财务决算表。反映工程历年资金来源、投资支出、交付使用财产以及结余资金等综合情况。

单机决算　多台发电机组同期建设的项目，每台机组正式投入运行以后，须编制单机竣工决算。编制范围为当期完成投入运行和交付使用的固定资产、流动资产、递延资产和无形资产及有关费用。待工程全部完工后，再将每台机组分摊的费用进行调整。

K

kasite

喀斯特 (karst) 见岩溶。

Kabolabasa Shuidianzhan

卡博拉巴萨水电站 (Cabora Bassa Hydropower Station) 位于非洲东南部莫桑比克境内赞比西河中游，距海口500余千米。电站开发建设将为开采莫桑比克和邻国的矿产资源和发展这一地区的钢铁和氮肥工业提供电力，并兼有灌溉、航运等综合利用效益，见图1。设计装机容量4150MW，多年平均年发电量205亿kW·h。工程分期建设，初期装机2075MW，除用220kV送电给附近地区外，大部分电力用2回±533kV直流输电线送电至南非的约翰内斯堡，距离1414km，初期按±266kV运行。

水文和水库特性 坝址以上流域面积90万km^2，多年平均流量2750m^3/s，多年平均年径流量868亿m^3。水库正常蓄水位326.00m，回水长250km，至莫桑比克与赞比亚的国境，水库面积2580km^2，相应库容630亿m^3。死水位295.00m，调节库容517.5亿m^3，库容系数为0.60。连同上游干流的卡里巴(Kariba)水库和支流卡富埃河伊太齐太齐(Itezhitezhi)水库，共计调节库容1008亿m^3，可进行多年调节。

工程地质条件 坝址基岩为良好的粗晶花岗片麻岩。

枢纽布置 枢纽工程由大坝、泄水建筑物、厂房等组成，见图2。



图1 卡博拉巴萨水电站

大坝 主坝为混凝土双曲拱坝，坝顶长321m，最大坝高171m，顶厚4m，底厚23m，坝体混凝土51万m^3。

泄水建筑物 8个深孔设在坝顶以下100m处，底板高程由231m向上倾斜至243m，末端设挑流鼻坎，出口用弧形闸门控制，每孔宽6m、高7.8m。另在坝顶设一个溢流表孔。总泄洪能力为16 000m^3/s。

厂房 初期地下式厂房建在右岸，由5个进水口分别经压力钢管引水至厂房。主厂房长220m、宽26m、高57m，安装5台单机容量为415MW的混流式水轮发电机组。变压器室位于厂房上游的地下，高压出线经直径为7m的电缆井通至地面。厂房下游有2座尾水调压室，宽21m，高71.7m，分别长72m和76m；下接2条尾水洞，分别长240m和320m，断面面积均为300m^2，过流能力2200m^3/s。水轮机转轮直径6.56m。额定水头103.5m，额定出力415MW；最大水头127m，最大出力484MW，设计水头103.5m。发电机额定容量480MV·A，转速为107.1r/min，飞逸转速为212r/min，功率因数0.85，电压16kV，频率50Hz。

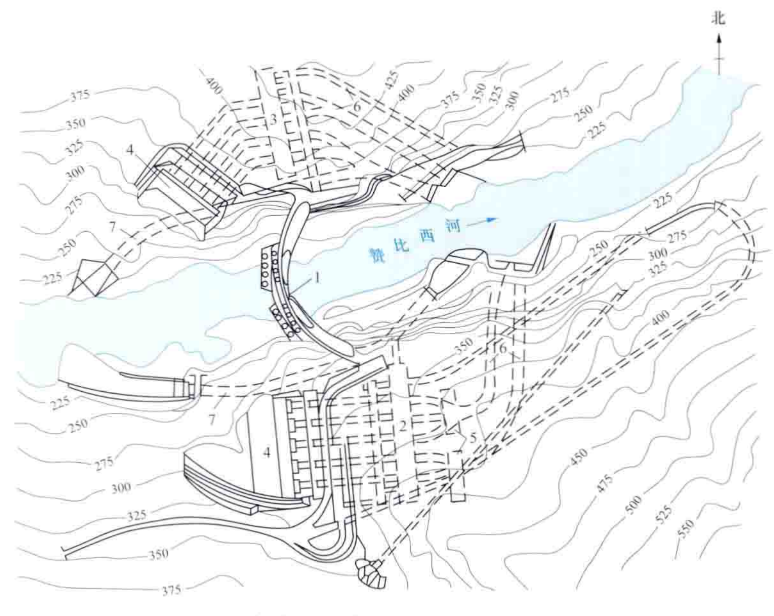


图2 卡博拉巴萨水电站枢纽平面布置图

1—双曲拱坝和泄洪深孔；2—初期地下厂房；3—第二期地下厂房；4—进水口；5—调压室；6—尾水洞；7—导流洞

二期工程的地下厂房布置在左岸，计划安装5台单机容量与初期相同的机组。

工程施工 工程由葡萄牙设计和建设。于1968年11月开始施工准备，1969年10月正式开工，1975年4月开始发电，1979年初期工程竣工，总工期10年。二期工程于2009年开工。

主要工程量：初期工程工程量，土石方明挖330万m^3，石方地下开挖120万m^3，混凝土浇筑120万m^3。

Kalun Sanji Shuidianzhan

卡伦三级水电站 (Karun Ⅲ Hydropower Station) 位于伊朗西南部卡伦河上游，距胡齐斯坦省伊泽市28km，距上游卡伦一级水电站约120km，见图1。装机容量

2000MW，多年平均年发电量 41.72 亿 kW·h。工程主要目的为供水、防洪、灌溉和发电，年供水量为 10.7 亿 m^3。电站输电电压 400kV。

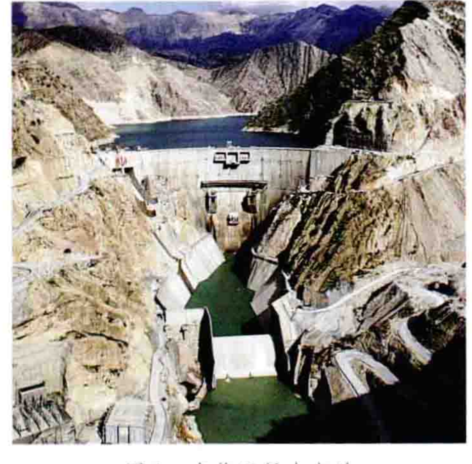


图 1 卡伦三级水电站

水文和水库特性 坝址以上流域面积 65200km^2，多年平均流量 575m^3/s。水库正常蓄水位 845.00m，相应库容 29.7 亿 m^3，水库长 60km，水面面积 48km^2。

工程地质条件 坝址区基岩主要为灰岩，设计地震烈度为 7 度。

枢纽布置 枢纽工程由大坝、泄水建筑物、引水发电系统等组成，见图 2。

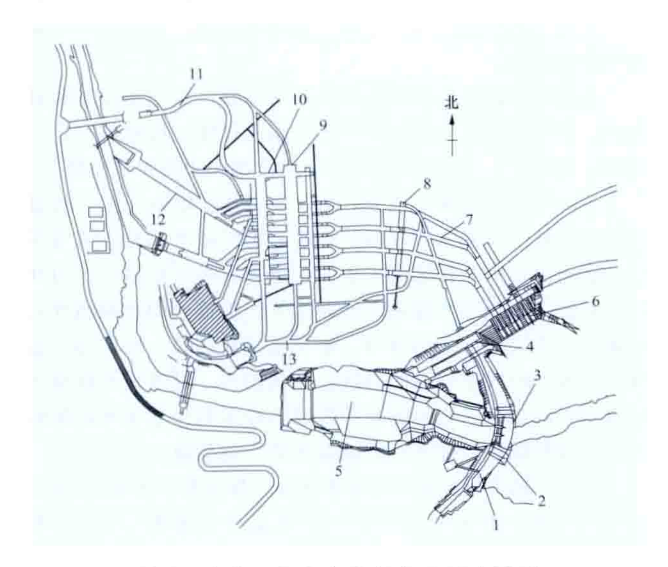


图 2 卡伦三级水电站枢纽平面布置图

1—大坝；2—底孔；3—表孔；4—滑雪式溢洪道；5—水垫塘；6—电厂进水口；7—发电引水洞；8—控制闸门廊道；9—主厂房；10—主变压器洞；11—进厂隧洞；12—尾水洞；13—通风洞

大坝 双曲拱坝，最大坝高 205m，坝顶长 462m、顶厚 5.5m，坝基厚 29.5m，坝体混凝土方量 130 万 m^3。工程灌浆总长度为 436.5km，灌浆廊道总长 2423m，帷幕灌浆深 100m。

泄水建筑物 坝身布置有 3 个表孔、2 个底孔以及右岸布置 2 孔滑雪式溢洪道。滑雪式溢洪道承担主要泄洪任务，长度分别为 94m 和 57m，宽分别为 19.5m 和 22.5m，最大泄流量 8710m^3/s。进水口采用弧形闸门控制，检修门为叠梁门。下游水垫塘长 400m。坝顶 3 个表孔为辅助泄洪，无闸门控制，溢流前沿长 54m，泄流能力为 1500m^3/s。2 个底孔承担应急泄洪任务，进口采用弧形闸门和叠梁门。

引水发电系统 位于右岸，引水洞长 551.5m，内径 12.6m，开挖直径 14m，混凝土衬砌。压力钢管长 64.75m，进口直径 8m，机组进口处直径为 5.32m。

厂房为地下厂房，布置在大坝下游 500m 的右岸山体内，主厂房长 250m，高 48m，宽 25m。主变压器洞长 234m，高 27.8m，宽 21m。厂房内安装 8 台单机容量为 250MW 的混流式水轮发电机组，水轮机额定水头 161m，转轮直径 4.54m，额定流量 173m^3/s，效率 94%，由中国哈尔滨电机厂生产。机组最高发电水位 850.00m，最低发电水位 800.00m，正常发电水位 845.00m。发电机转速 187.5r/min。变压器容量 263MV·A，电压 187.5kV。

工程施工 围堰挡水，导流洞过水，初期导流标准 3 年一遇洪水。2 条导流洞导流，长度分别为 613m 和 536m，内径 13m，开挖直径 15m，断面为 U 形和圆形，导流流量 1850m^3/s。

工程于 1999 年开工，土建工程于 2004 年完工，2005 年 3 月第一台机组发电，2007 年 8 台机组全部投入运行。

主要工程量和造价：土石开挖量为 1500 万 m^3，混凝土工程量 270 万 m^3，其中地下厂房开挖量和混凝土工程量分别为 190 万 m^3 和 57 万 m^3，交通道路总长 33km，地下隧洞长 22km。采用设计、施工和设备采购总承包方式。工程造价 17 亿美元。

设计单位 Mahab Ghodss 咨询工程公司。

建设单位 伊朗国家能源部水电开发公司（IWPC）。

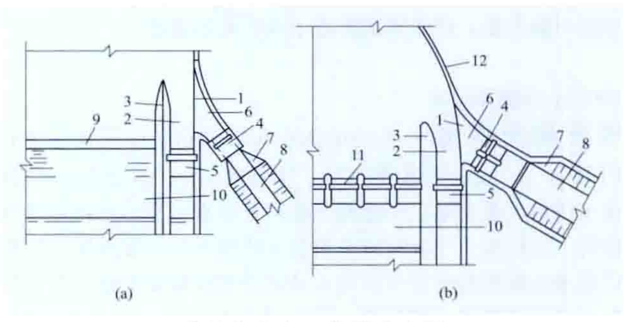
kaichangshi jinshuikou

开敞式进水口

（open intake） 进水口流道具有自由水面，且水面以上净空与外界空气保持贯通的水电站进水口。又称无压进水口。适用于低坝小库、没有调节库容、运行水位变幅不大的引水式水电站。开敞式进水口布置见下图。

设有开敞式进水口的枢纽工程，在进行坝址选择时，除要考虑工程地形、地质，对外交通和施工等条件外，还要充分考虑进水口的“三防”（防泥沙、防污物、防冰冻）要求。一般情况下，应将进水口布置在主河道和主流稳定的河段上，如在遇有弯曲的河段处，宜将进水口布置在凹岸偏下游处，可使表层较清的水流流入进水口。有时可增设导流建筑物形成横向环流，以利于渠道引水和防止泥沙淤积。

进水口引水轴线与河道水流的夹角称为引水角，引水角



开敞式进水口布置示意图

(a) 直流段引水布置示意图；(b) 河弯段引水布置示意图

1—拦沙坎；2—沉沙槽；3—束水墙；4—进水闸；5—冲沙闸；6—进口连接段；7—出口连接段；8—引水渠道；9—溢流坝；10—消力池；11—泄洪闸；12—凹岸

一般为锐角。引水角较大，可以减少泥沙进入渠道，但如果引水角过大，则会影响进水流态平顺，减少引水流量。

开敞式进水口的下游，一般多设有抬高水位的壅水建筑物。也有采用无坝引水的，引水设施比较简单而经济，但引水流量会受到限制，受河道变迁的影响大，且在枯水季节或遇特枯水年，引水流量不易保证。低坝引水的布置分低坝冲沙闸式和拦河闸式两种。其中，拦河闸运用比较灵活，在洪水期部分或全部打开闸孔，可基本恢复原天然河道的比降和水流特性，可大量排放被洪水带来的泥沙和漂浮物，尤其是可以通畅地排放推移质，对防止进水口前泥沙淤积很有效。

防沙措施　为了起到有效的排沙作用，对于设有泄洪闸与进水口配套的引水枢纽，泄洪闸的底板应低于进水口底板高程。而对于设有溢流坝与进水口配套的引水枢纽，则应在溢流坝与进水口之间设置有足够孔口尺寸的冲沙闸。冲沙闸的底板高程亦应低于进水口的底坎高程，可结合进水口的布置设计拦沙底坎。拦沙底坎既可拦截沿河底移动的大量推移质，亦可起到导沙顺流的作用，使随洪水而来的河流底沙由泄洪闸或冲沙闸排向下游。一般在泄洪闸（或溢流坝）与冲沙闸连接处均设有向上游延伸的导流墙，它具有束水和冲沙的双重作用，又称束水墙。在冲沙闸关闭期间导水墙与进水口之间将形成沉沙槽，用以沉积泥沙；在冲沙闸开启时又将成为冲沙道，沉积在其间的泥沙就会被排向下游。

根据不同河流的水沙特性和水电站进水枢纽布置的情况，虽然经过拦沙底坎、沉沙槽等拦截和冲沙闸的冲刷运用，仍有部分颗粒较大的泥沙会进入引水管道。因此，有时尚需在进水口后的适当位置设置沉沙池，使进入引水渠道的泥沙通过沉沙池后沉淀下来，保证进入引水道的水流为清水，沉积在沉沙池内的泥沙，可通过冲沙廊道排向下游。

防污措施　在进水口前设置拦污栅，阻止污物进入管道，是防止污物进入水轮机的主要手段。在可能的条件下，设计过栅流速采用较低数值（$v<1\text{m/s}$），既可减少水头损失，又便于污物清除。

防冰措施　在严寒地区的河道上，多在进水闸的闸室设排冰道排冰。进水闸前的冰盖除减少发电引用流量外，对建筑物、拦污栅和闸门会产生很大的冰压力。消除这一压力的方法有：①沿建筑物挡水面用人工或机械方法破冰，使冰盖与建筑物脱离接触；②调节水与建筑物接触带的温度，如在其上盖暖房；③采用电热拦污栅和金属闸门；④将压缩空气通过插入水下一定深度的铁管吹出气泡；⑤直接用潜水泵将深部水抽上来，使水面温度高于冰点而不结冰。

keneng zuida baoyu

可能最大暴雨　(probable maximum precipitation, PMP)　现代气候条件下，特定地区，一定历时内可能发生的最大暴雨量。可能最大暴雨是根据已有的暴雨和气象资料，运用水文气象学理论和方法估算的最大暴雨值。估算可能最大暴雨是估算可能最大洪水的重要组成部分。作为计算设计洪水的另一种途径，称为水文气象法。其基本点是：广泛收集流域内外的暴雨气象资料，深入研究各次暴雨的特性，尤其对暴雨的特大值作详尽的天气系统分析、暴雨移置判断等工作，并采用外推放大、外包等方法适当处理，以达到可能最大暴雨的水平。计算的主要步骤包括典型暴雨选择、典型暴雨放大和外包处理。

典型暴雨选择　在分析研究各场暴雨资料的基础上，结合工程的设计要求，选定典型暴雨。根据暴雨资料来源的不同，典型暴雨可分为当地暴雨、移置暴雨和组合暴雨3类。

(1) 当地暴雨。为本流域实测或调查到的实际发生的大暴雨或特大暴雨。

(2) 移置暴雨。为外流域移置来的大暴雨或特大暴雨。移置的条件为：①天气气候上能发生相似特性的暴雨；②地形上基本相似，如两地的高程或地理位置不同，可作适当修正。

(3) 组合暴雨。适用于推求大面积、长历时的可能最大暴雨，即将两场或两场以上的暴雨按天气气候学的原理合理地组合在一起，构成一场新的暴雨作为典型暴雨。

典型暴雨放大　根据各场典型暴雨成因分析得出的气象因子进行放大。放大的方法有水汽因子放大、动力因子放大以及水汽和动力因子联合放大3种。

(1) 水汽因子放大。常采用可降水作为放大指标。

(2) 动力因子放大。常采用风速、辐合上升速度等作为放大指标。

(3) 水汽和动力因子联合放大。常用的有可降水和风速联合因子放大、水汽输送率放大等。

对组合暴雨的放大，一般只按其中主要一场暴雨的气象因子进行放大。

确定放大指标常用两种方法：①选择历史上出现过的最大值；②对放大采用的气象因子作频率计算，选择某一较小频率，如50年一遇或100年一遇的数值作为放大最大值。

外包　初步估算的成果，由于资料条件限制，由一场暴雨放大或放大移置来的暴雨，有时不能保证其成果达到可能最大暴雨的水平。在某些工程的可能最大暴雨计算中，用外包的方法以求达到可能最大暴雨水平的数值，即将多场放大的暴雨及放大移置来的暴雨，绘制成暴雨的时、面、深外包线，在该外包线上读得的可能最大暴雨值，可体现可能最大暴雨水平的数值。这种外包线既能插补未发生或未测到的数值，也能协调各时段及各种流域面积上的数值。

简史　推求可能最大暴雨的水文气象法始于美国20世纪30年代中期。中国从20世纪50年代起开展这项工作，70年代水利电力部编制了中国可能最大24h点雨量等值线图。1979年水利部和电力工业部颁发《水利水电工程设计洪水计算规范》时，正式将水文气象途径估算可能最大暴雨列入。

现代气象科学关于暴雨物理机制还不足以精确计算暴雨的可能最大值，对可能最大暴雨的估算值需进行多方面的合理分析，与已有观测到的特大暴雨记录进行比较，在空间上可推广到气象上和地形上可以比拟的地区，在时间上可包括历史上曾经发生过的特大暴雨。这些对可能最大暴雨的估算都是很有参考价值的。

参考书目

詹道江，邹进上．可能最大暴雨与洪水．北京：水利电力出版社，1983．

keneng zuida hongshui

可能最大洪水　(probable maximum flood, PMF)　在特定流域上可能产生的最大洪水。可能最大洪水是考

虑以最恶劣的气象和水文条件组合形成的洪水。在工程设计中，认为以此估算的设计洪水被超过的可能性是极小的。可能最大洪水计算首先要根据水文气象学的理论和方法，估算出可能最大暴雨，再考虑以较小的土壤入渗损失，进行产流、汇流计算，求得设计断面的可能最大洪水过程线。

由暴雨转换到洪水的过程，有传统经验方法和降雨流域模型方法两类计算方法。传统经验方法，即用暴雨径流相关与扣损的方法进行产流计算，用单位线、河网汇流曲线与推理公式等方法进行汇流计算。降雨流域模型方法，即输入降雨或其他气象因子，直接输出洪水过程。在可能最大暴雨条件下，对某些产汇流参数可作特殊考虑。例如，在产流计算方面，流域前期影响雨量 P_a，在湿润地区可考虑等于流域最大损失量 I_m，但干旱地区不宜采用。在净雨的推求上，对湿润地区可以认为全部降雨都产生径流，暴雨径流关系的高水位部分可按45°线外延，或只按扣除稳渗的办法计算净雨；对于旱地区，多用下渗曲线或初损后损法求净雨，并注意雨强、雨量对产流的影响，采用由特大雨洪推出的数值。在汇流计算方面，由于汇流的非线性影响，应尽量选用由实测大洪水资料分析得出的单位线或推理公式中的参数值。如果缺乏大洪水资料，应考虑计算参数的非线性外延修正。

美国自20世纪30年代开始采用可能最大洪水作为重大水库工程的设计洪水标准。其他国家，如英国、加拿大、印度、菲律宾等国，也多采用可能最大洪水作为水库设计洪水的最高标准。中国从20世纪50年代后期开始，在个别工程设计中作过可能最大暴雨和可能最大洪水的估算。SDJ 1278《水利水电枢纽工程等级划分及设计标准》、DL 5180《水电枢纽工程等级划分及设计安全标准》均规定，以可能最大洪水作为失事后对下游将造成特别重大灾害的土坝、堆石坝及其泄水建筑物非常运用（校核）洪水的标准。

由于科学技术水平和水文气象资料条件的限制，可能最大暴雨及可能最大洪水的计算还只能是近似的推求，其计算成果要经过多种方法进行综合分析，合理选定。

参考书目

詹道江，邹进上．可能最大暴雨与洪水．北京：水利电力出版社，1983.

Kelasinuoya'ersike Shuidianzhan

克拉斯诺雅尔斯克水电站

（Krasnoyarsk Hydropower Station） 位于俄罗斯西伯利亚叶尼塞河干流上，开发任务以发电为主，兼有航运及防洪效益，见图1。电站总装机容量6000MW，多年平均年发电量204亿kW·h，以220kV和500kV电压输电线路向西伯利亚联合电力系统送电。

水文和水库特性 坝址以上流域面积28.9万km²，多年平均年径流量884亿m³。正常蓄水位243.00m，相应库容733亿m³，水库回水长340km，水库面积2000km²。死水位225.00m，调节库容304亿m³，库容系数0.34，连同上游萨扬-舒申斯克水库合计库容系数0.52，可进行多年调节。坝址处实测最大洪峰流量29 800m³/s。



图1 克拉斯诺雅尔斯克水电站

工程地质条件 坝址基岩为坚硬花岗岩。

枢纽布置 枢纽工程由大坝、泄水建筑物、厂房和通航建筑物等组成，见图2。

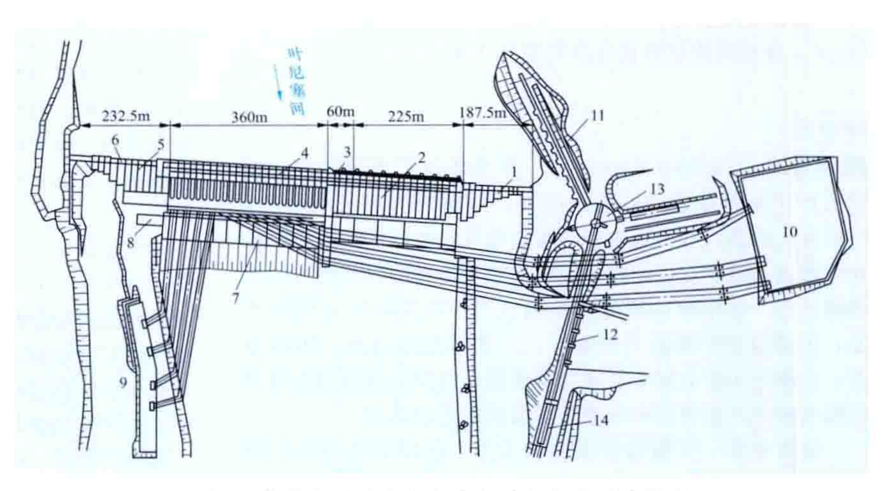


图2 克拉斯诺雅尔斯克水电站枢纽平面布置图

1—左岸非溢流坝；2—溢流坝；3—河床非溢流坝；4—厂房坝段；5—右侧河床非溢流坝；6—右岸非溢流坝；7—厂房；8—安装场；9—220kV开关站；10—500kV开关站；11—上游行船道；12—下游行船道；13—转向装置；14—承船厢

大坝 混凝土重力坝，坝顶长1065m，最大坝高124m，上游面垂直，下游面坡度为1∶0.7～1∶0.8。自左向右包括：左岸非溢流坝，长187.5m；溢流坝，长225m；河床非溢流坝，长60m；厂房坝段，长360m；右岸非溢流坝，长232.5m。坝体由伸缩缝分成71个坝段，每个坝段宽15m。沿坝基设减压排水廊道，宽4～6m。坝基帷幕灌浆深度为60m。

泄水建筑物 溢流坝设7个溢流孔口，孔宽25m、高12.5m，用滑动式平面闸门控制，在正常蓄水位时可下泄流量12 000m³/s，采用挑流消能。加上8台机组泄量4800m³/s，可下泄1000年一遇洪水。

厂房 坝后式厂房，压力钢管管径7.00m，外包钢筋混凝土，采用背管方式布置。每两条引水钢管在机组上游

侧合并成一条，向一台水轮机供水。厂房高 18.0m，宽 30.0m，长 430.00m。厂房内安装 12 台 500MW 混流式水轮发电机组。转轮直径 7.50m，额定转速 93.8r/min，额定水头 93.00m 下的额定出力为 508MW，引用流量 615m³/s。伞式发电机最大视在功率 588MV·A，转子直径 16.10m，采用强制风冷，定子采用水内冷。发电机功率因数 0.85，电压 15.75kV，采用晶闸管励磁。220kV 开关站布置在右岸厂房下游，500kV 开关站设在左岸船闸转向装置右侧。

通航建筑物　斜坡式升船机设于左岸，由下游引船道、上游引船道、承船厢、斜坡道和坝顶转向装置组成，其升船能力为 2000t。

工程施工　工程于 1956 年开始施工准备；1961 年开始浇筑混凝土；1962 年截流；1964 年发现厂房坝段坝基岩石内有缓倾角裂隙分布后，及时改变了厂房坝段和厂房水下部分的结构设计，增加坝下游棱体深度，使坝的水平载荷由坝体、压力钢管镇墩和厂房共同承担；1967 年 11 月 2 台机组发电，1971 年第四季度 12 台机组全部投入运行。总工期 11 年。升船机于 1976 年完成安装，试运行 10 年后，由航运部门验收。

主要工程量：土方开挖 534 万 m³，石方开挖 764 万 m³，土石方回填 724.8 万 m³，混凝土和钢筋混凝土 552.2 万 m³，金属结构和机械设备安装 7.0 万 t。

kongfuba

空腹坝 (hollow dam)

在坝体内沿坝轴线方向设置大尺寸纵向空腔（空腹）的坝。空腹坝的主要优点有：①节省工程量，在河床狭窄的坝址布置地面厂房困难时，可在空腹内布设厂房。②通过改变空腹坝体型的内外轮廓改善坝体应力。③空腹可降低坝基扬压力。空腹坝的主要缺点是：①结构设计和施工较复杂。②钢材用量较多。按坝型分，空腹坝主要有在重力坝内设置纵向空腔的空腹重力坝和在重力拱坝内设置纵向空腔的空腹拱坝两种类型。

空腹轮廓　空腹的形状和尺寸为：①对于空腹内不设厂房的坝，在剖面上空腹形状近似半个椭圆，椭圆的长轴与水平面约成 60°角，空腹的高度一般小于坝高的 1/3，超过时需对前、后腿加固，最高也不宜超过坝高的 1/2。在坝剖面的水平方向，前腿、空腹和后腿的宽度各占总的坝底宽度的 1/3 左右，前腿的比例略大较为有利。②对于空腹内设置厂房的坝，空腹还应满足厂房的布置要求，由于尾水管对后腿有削弱作用，因此最好采用窄而高或方圆形的尾水管。

简史　20 世纪 60 年代在葡萄牙修建了宾波斯塔 (Bemposta) 空腹拱坝（坝高 87m）和卡腊帕提洛 (Callapatelodaha) 空腹重力坝（坝高 57m）。70 年代和 80 年代空腹坝在中国有较大的发展，至 1985 年已建成空腹坝 17 座。广东省的枫树坝水电站大坝，坝高 93.3m，空腹内设有 2 台 75MW 的机组和变电站等，坝顶溢流；凤滩水电站空腹拱坝，世界上最高的空腹拱坝（见图），坝高 112.5m，坝顶溢流，坝内设有 4 台 100MW 的机组和变电站等；湖南省的岩屋潭空腹砌石重力坝，高 66m。由于空腹坝结构和施工复杂，已很少采用。



凤滩水电站空腹拱坝

konghua

空化 (cavitation)

水体在恒温下减压，出现空泡的现象。又称空泡、空穴。由溶解于水中的气体扩散、膨胀而形成的空泡，称为含气型空化，其形成和发展比较缓慢。由水体汽化而形成的空泡，称为含汽型空化。其生成、发育和溃灭都是猝发型的，对水力机械或水工建筑物固体边界常造成空蚀破坏。通常工程中空蚀多由含汽型空化所造成。水体含有杂质（微小固体颗粒及依附其上的“汽核”）才会有空化发生，不含杂质的水体具有很大的抗拉强度，不易出现空化。

空化的形态有固定空化、游移空化、振荡空化和旋涡空化 4 种类型。1873 年，O. 雷诺 (O. Reynolds) 就曾预言，高速转动的船舶螺旋桨将会产生“真空洞”。1897 年，英国“果敢号”鱼雷艇的推进器效率严重下降事件的发生，人们开始提出空化的概念。20 世纪 30 年代，水工建筑物中的空化现象亦开始引起人们的注意。第二次世界大战后，随着生产建设的发展，液体流场的空化现象常有发生，对空化的研究随之有了较大进展。

空化研究内容有空化机理（空泡动力学）、空化噪声、空蚀破坏、防空蚀措施及超空化研究等。

表征液体流场空化特征的基本参数是空化数（又称空穴系数、空泡数），其表达式为

$$\sigma=\frac{p_0-p_v}{\frac{1}{2}\rho v_0^2}$$

式中 σ 为空化数；p_0 和 v_0 为未受扰动的来流压强和流速；p_v 为环境温度下饱和蒸汽压强；ρ 为液体密度。空化数常被用来表示液体中空化发生条件和空化发展程度，而且还是液体空化的动力相似准则。

表征流场边界空化特征的参数是初生空化数 (σ_i)。当流场边界上局部压强降低时，液体中的汽核发育生长，直至出现微小短暂的瞬态空泡，称为空化初生，此临界状态下的空化数称为初生空化数。初生空化数反映流场边界特征，且与液体性质（密度、黏性、杂质含量等）、流场动力因素（流速、绝对压强等）等有关。具体条件下的初生空

化数常由实验确定。当边界附近的流动不发生分离时，初生空化数的理论值可借物体表面的最小压力系数 $C_{p,\min}$ 来确定，即

$$\sigma_i = -C_{p,\min} = \frac{p_0 - p_v}{\frac{1}{2}\rho v_0^2}$$

式中 $p_{\min}$ 为流场边界的最小压强。初生空化数常被用来判断空化是否发生。当液体空化数 σ 大于既定边界的初生空化数 σ_i，即 $\sigma > \sigma_i$ 时，空化不会发生；$\sigma \approx \sigma_i$ 时，空化初生；$\sigma < \sigma_i$ 时，空化发展。

对空化的认识主要依赖于实验室的模拟空化试验和生产实践中对空蚀现象的观察。室内模拟试验存在缩尺效应问题，因为模拟试验的模型尺度、绝对流速、物面状况、液体性质（杂质含量、热力学性能……）等因素与原体总是存在差异，不可能做到完全相似。实际工程中，空化现象的测试手段尚不完善，不易直接观察到，通常用“水听器”（空化监听探头）监测空化发生后的噪声，或通过其产生的空蚀后果来分析和推断空化是否发生和发展。

参考书目

柯乃普 R T，戴利 J W，哈密脱 F G. 空化与空蚀. 水利水电科学研究院，译. 北京：水利出版社，1981.

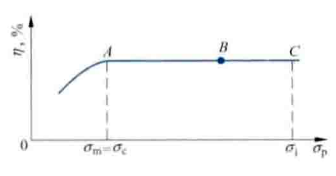
Knapp R T，Daily J W，Hammitt F G. Cavitation. New York：McGraw-Hill Publishing Co.，1970.

konghua xishu

空化系数 （coefficient of cavitations） 表征水轮机空蚀性能的无量纲系数。在水电站的水轮机、水泵水轮机或蓄能泵选型设计中采用的空化系数主要有两类：一类是反映水力机械自身空化特性的技术指标，包括水轮机空化系数（也用于水泵水轮机的水轮机工况）和蓄能泵空化系数（也用于水泵水轮机的泵工况），以 σ 表示，过去称气蚀系数；另一类是反映水电站空化条件的技术指标，称为电站空化系数，以 σ_p 表示，过去称装置气蚀系数或电站装置气蚀系数。

水轮机或蓄能泵空化系数　水轮机或蓄能泵在运行中转轮或叶轮流道内压力最低点的动态真空相对值，反映水力机械自身的空化特性，是表征水轮机或蓄能泵空化发生条件和性能的无因次数。水轮机或蓄能泵的空化系数与其型式或比转速（n_s 或 n_q）、叶片形状、运行工况和流道特性等因素有关。在相同水头或扬程条件下，水轮机或蓄能泵的空化系数越大，说明运行中转轮或叶轮流道内压力最低点的动态真空值越大，其空化特性越差。然而，受水力机械固有特性的约束，对适用于某水头或扬程段的水轮机或蓄能泵，其空化系数的减小将受到限制。

水轮机或蓄能泵空化系数难以用理论方法准确求得，一般是首先在试验台上用改变电站空化系数的方法测定模型空化系数 σ_m，再根据实践经验将 σ_m 用于具体工程。试验中模型空化系数 σ_m 的取值方式有两种。第一种是随着电站空化系数的改变首先测得电站空化系数与模型效率的关系，见图，再将图中效率突降点 A 对应的电站空化系数确定为模型空化系数 σ_m。由于 A 点位于空化显著影响模型效率的临界位置，故利用该方法确定的模型空化系数又称临界空化系数 σ_c。实际上在 B 点（见图）往往已经发生空化，但强度不大，对模型效率尚无明显影响。第二种 σ_m 取值方式建立在模型内特性试验方法之上，即通过肉眼观察，取模型转轮或叶轮流道内开始出现空化气泡时的电站空化系数为模型空化系数（如图中 C 点），称为初生空化系数 σ_i。显然，对于同一台水力机械，其初生空化系数 σ_i 大于临界空化系数 σ_c。



水力机械空化特性

由于模型与原型尺寸的差异以及试验与现场的水头（扬程）、水质条件不同，一般原型空化系数大于模型空化系数，因此模型空化系数需根据实践经验适当修正后再用于具体工程。例如，当采用临界空化系数 σ_c 作为模型空化系数 σ_m 时，实践中为使水轮机运行安全可靠，一般将模型空化系数乘以裕量系数 K_σ，并要求

$$\sigma_p \geqslant K_\sigma \sigma_m$$

根据设计、制造和运行经验，K_σ 一般取值为 1.1～1.6，对电站水流含沙量和含气量大、转轮叶片等材料采用一般碳钢制造、机组经常偏离最优工况运行等情况，K_σ 取大值。

电站空化系数　扣除当地水温条件下的水的汽化压力后，安装在该电站的水力机械转轮或叶轮流道内动态压力最低点的静态压力相对值，也是一个无因次数。电站空化系数与安装高程、电站下游水位、水的汽化压力和大气压力等因素有关，而与水轮机或蓄能泵的空化性能无关。其计算式为

$$\sigma_p = \frac{H_{ab} - H_{va} - (Z_i - Z_{FL})}{H}$$

式中 H_{ab} 为电站当地大气压力，以水柱高表示，m；H_{va} 为当地水的汽化压力，以水柱高表示，m；Z_i 为水力机械安装高程，m；Z_{FL} 为电站下游水位；H 为工作水头，m。

在相同水头或扬程条件下，一座水电站的电站空化系数越大，说明安装在该电站的水轮机或蓄能泵的转轮或叶轮流道内动态压力最低点的静态压力值越高，因此该电站对水轮机或蓄能泵的空化特性要求越低。然而，加大电站空化系数意味着降低水力机械安装高程，一般会增大电站投资。

当电站空化系数小于水轮机空化系数或蓄能泵空化系数时，说明转轮或叶轮流道内的最低压力已小于水的汽化压力，将发生空化。换言之，水轮机或蓄能泵不发生空化的条件为

$$\sigma_p > \sigma$$

空化的发生可能造成水力机械过流表面材料损坏，即空蚀，引起水力机械振动，甚至影响水力机械的效率。因此，实践中应避免或减轻空化的不良影响。

kongshi

空蚀 （cavitation erosion） 流场固体边壁受空化溃灭的冲击作用而产生的剥蚀破损现象。又称气蚀。空蚀是空化的后果，它使水力机械效率降低，使过水建筑物遭受破坏。

形成过程　水利水电工程中高速水流流过边壁不顺直或不平整处，局部压强降低而出现了空泡，空泡随水流移至下游高压区后，其周围的压强一般是不平衡的，压力高的一侧开始变形，形成微型液体射流，穿透空泡，在空泡行将溃灭的瞬间，微射流达到极高的速度，并以极大的冲击力作用于

边壁表面，空泡连续溃灭的冲击作用，致使边壁材料产生疲劳而剥落破损。与此同时，空化溃灭还产生自由氧，加剧了对边壁材料的化学腐蚀作用。

主要特征　破损面呈麻点状痕。轻度空蚀，常以单位时间内在单位面积上出现的麻点数作为空蚀率（空蚀强度）指标；严重空蚀多呈大面积空蚀坑，破损面上仍可见麻点状蚀痕，通常用单位时间内物面材料损失的质量（或体积）作为空蚀率指标。另外，按空化溃灭的微射流模式，空蚀强度系数可写为

$$\eta=\frac{I_c}{\frac{1}{2}\rho v_0^2}=\frac{\sigma}{\delta}(\Delta\sigma)^2\exp\left[-\frac{2.67}{W(\Delta\sigma)}\right]$$

其中

$$\Delta\sigma=\sigma_i-\sigma$$

式中 I_c 为空化溃灭强度；ρ 为液体密度；v_0 为液体流速；σ_i 为既定边壁体型的初生空化数；σ 为当地水流空化数；δ 为相对汽核尺度；W 为韦伯（Weber）数。空蚀率与暴露时间的关系是非线性的，从空化发生到空蚀开始有一个潜伏期，在此期间没有蚀痕；空蚀一旦开始出现，空蚀率陡增，很快达到最大值；此后，空蚀率增长缓慢，几乎趋于某一稳定值。R. T. 柯乃普（R. T. Knapp）指出，空蚀率约与当地液体流速的 6 次方成正比。水工建筑物中的空蚀常伴生磨蚀与动水压力等作用，致使破坏范围扩大，如图所示。



刘家峡泄洪洞空蚀破坏实例

影响因素　影响空蚀的因素有流动因素（流速、压强等）、液体性质（杂质含量、含气量、密度、温度等）、边壁材料（物质结构、弹性模量等）、空化历时等。

研究目的　空蚀研究的主要目的是寻求防蚀减蚀的技术措施，包括：①改善流场固体边界形状，以改善局部压强状态。如改善水翼、水轮机叶片的形状，优化水下运动物体或水工建筑物的体型设计，控制过流表面的施工不平整度等。②寻求耐蚀或抗蚀的物面材料。早期认为金属材料硬度高、弹性模量大，曾广泛用于防蚀；随后发现非金属的塑性材料（如环氧树脂、硅粉等）可提高物面的抗蚀性能，因此，水工建筑物中有时采用环氧涂层、硅粉混凝土等抗蚀材料。③利用水流掺气来减蚀（见掺气水流）。例如，在过水建筑物流速高、压强低的部位设置掺气槽（坎）向可能发生空化的过流部位通气，在水轮机下部尾水管内增设通气孔等。

kongkou chuliu

孔口出流（orifice flow）

通过水库或容器中各种形式孔口的泄流。孔口出流视其水库上游水位或容器中压强是否变化，分为恒定出流和不恒定出流；视其下游水位是否影响孔口泄流能力，分为淹没出流和自由出流。水利水电工程中为控制和调节流量而设置的各型孔口，通常都视作水头为恒定的，主要有深孔出流和闸孔出流两大类。

深孔出流　如容器或水库的放空孔，船闸的充泄水孔，测量流量用的孔板、管嘴等的出流。孔口断面形状有圆形、方形等；孔口边缘有薄壁（锐缘）、厚壁或修圆（短管嘴）等不同情况。深孔出流的流量公式为

$$Q=\mu A\sqrt{2gH_0} \quad (1)$$

其中

$$H_0=H+\frac{\alpha v_0^2}{2g}$$

式中 H 为从孔口中心（底部孔口垂直出流时，取孔口以下 $d/2$ 处的收缩断面）算起的作用水头；$\alpha v_0^2/2g$ 为趋近流速水头（α 为流速分布不均匀系数）；A 为孔口断面积；μ 为流量系数（典型的圆形薄壁小孔口 $\mu=0.60$，标准管嘴 $\mu=0.82$）。

闸孔出流　最具代表性的是二维平底锐缘平板门局部开启（开度为 e）时的恒定自由出流（见图 1）。闸孔上游来流受孔口附近急剧变化的边缘约束而收缩，在过闸后下游（0.5～1.0）e 处出现小于开度 e 的收缩水深 h_c，闸孔出流的流量公式为

$$Q=bh_cv_c=\varphi\varepsilon be\sqrt{2g(h_0-h_c)} \quad (2)$$

式中 b 为闸孔宽度；v_c 为收缩断面的流速；ε 为收缩系数；φ 为流速系数。若令 $\mu=\varphi\varepsilon\sqrt{1-h_c/H_0}$，则式（2）化为一般孔口出流的流量公式，即式（1）。几种常见闸孔体型的流量系数 μ 值见表及图 1～图 3。如果孔口为淹没出流，实际计算时应引入淹没系数 σ_s。

闸孔出流 μ 值表

类　型	μ 值关系式	适用范围
平底锐缘平板门自由出流	$\mu=0.6-0.176\frac{e}{H}$	$0.1<\frac{e}{H}<0.65$
平底弧形门自由出流	$\mu=\frac{0.47+0.22\cos^2\alpha}{(e+H)^3}$	$\frac{e}{H}\leqslant0.7$ $15°<\alpha<90°$
实用堰上平板门自由出流	$\mu=0.65-0.186\frac{e}{H}$	

注：α 为扇形门下缘切线与水平线的夹角。

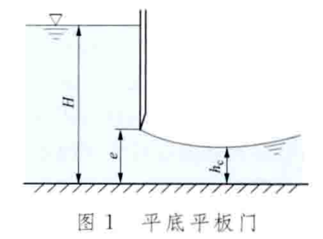


图 1　平底平板门

图 2　平底弧形门

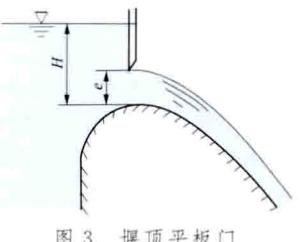


图 3　堰顶平板门

工程实践中，水库放空或船闸充水、泄水等的水力设计，由于水头逐渐变化而形成非恒定的孔口出流，但是因水库或闸室面积远大于孔口面积，闸前水位变化比较缓慢，实际计算时可用近似分析法，把孔口非恒定出流的过程划分为许多时段，在各时段内按恒定出流处理。

kongxian rongliang

空闲容量（idle capacity）

见装机容量。

kongzhi dianyuan

控制电源 (control power source) 水电站控制、保护、信号、测量系统及装置的工作电源。控制电源有直流和交流两类。直流控制电源主要来自直流系统，直流系统由充电装置和蓄电池组组成，也有的来自交流/直流变换装置。交流控制电源主要来自厂用电，还可由不间断电源和逆变电源提供。

直流控制电源 用于在水电站正常运行或事故情况下提供可靠工作电源。

额定电压 水电站直流控制电源的额定电压一般采用220V，也可采用110V；国际上有采用250V的，也有采用125V的。对于采用弱电控制的水电站，还设有60V以下的弱电直流电源，通常采用48V。

组成 主要由充电装置、监控装置、绝缘监视装置、蓄电池及蓄电池巡检装置等组成。

充电装置具有对蓄电池进行自动及手动浮充电、均衡充电、初充电功能，分为高频开关充电装置和晶闸管充电装置两种类型，充电装置根据电站的规模和当地电网的要求进行配置。当直流系统设置一组蓄电池时，充电装置配置一套或两套；当直流系统设置两组蓄电池时，充电装置配置两套或三套。

监控装置主要用来统一管理直流系统各装置，监视直流系统的运行情况，进行采集数据并处理，同时与电站监控系统建立通信联系。

绝缘监视装置用于在线检测直流电源系统的绝缘电阻、母线电压及母线对地电压，当出现异常时发出报警信号。

蓄电池分为铅酸蓄电池和碱性蓄电池。铅酸蓄电池一般采用防酸隔爆式铅酸蓄电池和阀控式密封铅酸蓄电池，碱性蓄电池采用镉镍碱性蓄电池。蓄电池组数和容量根据电站装机容量、机电设备配备情况和枢纽布置确定。

蓄电池巡检装置用于在线检测蓄电池组电压、容量，以及每只蓄电池的单体电压，便于蓄电池组的检修和维护。

交流控制电源 水电站的设备除由直流电源进行控制外，尚有许多设备需用交流电源进行控制。交流控制电源可直接由厂用电提供，也可由不间断电源（uninterrupted power supply，UPS）或逆变电源供电。对于监控系统主控级等重要的交流负荷，则采用不间断电源或逆变电源供电。

额定电压 水电站交流控制电源的额定电压采用220V。

组成 不间断电源由整流装置、蓄电池、逆变装置及切换开关等组成。正常情况下，整流装置将输入的交流整流成直流，逆变装置将直流逆变成交流。失去交流电源或整流装置故障时，由蓄电池为逆变装置提供直流输入。直流可取自不间断电源装置的自备蓄电池，也可取自电站直流系统。

逆变电源是不间断电源装置的简化形式，不含整流装置和蓄电池，用于将输入的直流逆变成交流，直流取自电站直流系统。

kongzhixing jindu

控制性进度 (key work schedule) 水电工程施工总进度中决定施工程序、速度及各期工程形象面貌的各项关键工程的工期计划。它是施工组织设计与建设管理工作的基本依据，也是优化进度、加快施工进度首先考虑的因素。

编制控制性进度，应首先分析选定控制工程发电的关键性工程项目，然后以关键性工程项目为主线，进一步研究其施工分期和施工程序，拟定控制性进度。由于水电工程关键项目进度一般与导流、施工方法等有密切的联系，因此，编制过程中需结合工程实际情况反复调整确定，关键线路上的项目工作应保证连续有序进行，且具有一定的逻辑关系。在主体工程、施工导流工程和其他各项辅助准备工程中，那些工期长，工程量大，施工难度高，可变因素多，对截流、工程安全度汛和首台机组发电起制约作用的关键项目，都应结合枢纽布置类型、工程特性、施工条件及建设要求等，重点研究并在控制性进度表中明确示出施工起讫时间。

在水电工程施工全过程中，其主要控制节点大致可归纳为：①对外交通、主要场内交通、施工用电投用时间，人员及机械设备进场时间；②导流工程开工、截流时间；③大坝正式开工、基坑进行开挖、坝体开始施工时间（或引水发电系统开工时间）；④水轮发电机组开始安装时间；⑤坝体拦洪度汛到水库蓄水时间；⑥永久泄水建筑物运行时间；⑦首台机组发电及工程竣工时间。此外，由于水电站是综合性开发工程，除保证发电进度外，还要兼顾过坝交通、航运、灌溉、防洪及下游供水等要求。这就对水电工程施工提出了控制水位和下泄流量等一系列要求，往往也构成控制工程进度的重要因素。

kushui diaocha

枯水调查 (low-flow investigation) 为弥补实测水文资料的不足，对未实测到的河流最低水位和最小流量进行实地调查和估算。主要内容包括调查考证枯水发生的时间、成因及重现期，枯水补给来源，灾情，人类活动影响及断面变化情况，并根据枯水调查资料，采用合理的方法推求出枯水流量等。

调查工作一般在枯水期开展，调查地点应尽量靠近永久建筑物或设施、居民点较多的河段进行，且河道较顺直、水流较稳定、断面冲淤变化不大及人类活动影响相对较小。调查历史枯水位应有两人以上指认的枯水痕迹，其可靠程度可按是否亲眼所见、叙述是否确切、旁证是否较多、标志是否固定等因素分可靠、较可靠和供参考3个等级进行评定。枯水调查的外业测量工作应包括枯水痕迹高程、现时水面线、横断面测量、枯水水位观测和流量测验等。根据历史枯水水位推算枯水流量时，可根据枯水痕迹的分布情况及河段的水力特性等选用下列方法：

（1）调查河段有实测水位流量资料时，可采用水位流量关系低水外延法、上下游相关法或退水曲线法进行推算。

（2）调查河段没有实测水位流量资料时，可采用实测大断面、枯水水面线资料及河道糙率，采用水力学公式进行推算。

（3）当本流域枯水调查条件较差，而相邻流域具有较好的枯水调查资料时，可采用水文比拟法推算。

kudi qingli

库底清理 (clean-up of reservoir site) 在水库蓄水前对淹没范围内原有的建筑物、构筑物、障碍物、污染

源、传染源及其传播生物的孳生地、林木等采取的清理活动。旨在保证枢纽工程及水库运行安全，保护库周及下游人群健康，控制水传染疾病，防止水质污染，同时为水库防洪、发电、航运、供水、旅游等综合开发利用创造有利条件。

水库库底清理设计任务是根据水电工程水库淹没影响范围、淹没特点以及水库运行方式，确定清理范围，提出清理项目和技术要求，计算清理工程量和清理费用。预可行性研究阶段可采取扩大指标估算库底清理费用；可行性研究阶段应进行库底清理设计，其内容包括确定库底清理项目和范围，调查分析并提出需清理的各种建（构）筑物等设施的类型与数量、卫生防疫清理目标及数量、林木清理工作量，提出清理方案和实施进度计划，编制库底清理投资概算；移民安置实施阶段编制库底清理实施办法。

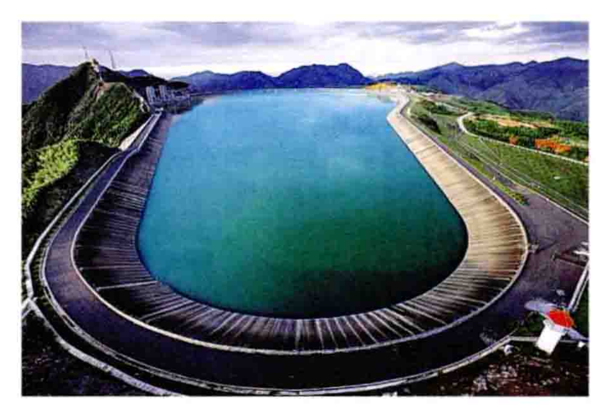
清理范围和项目　库底清理应根据水库淹没处理范围、清理对象、水库运行方式和水库综合利用要求确定，分为一般清理和特殊清理两部分。一般清理所需费用应根据清库工作量和清理措施计算，并列入建设征地移民安置补偿费用；特殊清理所需费用按照“谁受益、谁投资”的原则由有关部门自行承担。一般清理分为卫生清理、建（构）筑物清理、林木清理等3类。卫生清理范围为居民迁移线以下（不含影响区）区域；一般建（构）筑物清理范围为居民迁移线以下区域，大体积建（构）筑物清理范围为居民迁移线以下至死水位（含极限死水位）以下3m范围内；林木清理范围为正常蓄水位以下的水库淹没区。特殊清理是指在水库淹没处理范围内选定的水产养殖场、捕捞场、游泳场、水上运动场、航道、港口、码头、泊位、供水工程取水口、疗养区等综合利用水域所在地需要进行的清理。

清理技术要求　包括：①卫生清理。清理对象包括所有可能对水体产生污染的固体、液体废弃物，可分为常规（一般）污染源、传染性污染源、生物类污染源、一般固体废物、危险废物等。卫生清理需在地方卫生防疫部门的指导下，对库区内的各种污染源应进行卫生清理和消毒：对产生严重污染源的工矿企业、医院、传染病院、兽医院等所在地及堆存有毒物质的场地，要采取有效措施，确保原污染源地不产生污染物，保证水库蓄水后水质不受污染；对埋葬15年以内的坟墓，必须迁出库外或就地处理，坑穴进行消毒处理；具有供水任务的水库，还需进行专门的对各类污染源和传染病源的防污染处理。卫生清理验收应由县以上卫生防疫部门提供检测报告。②建（构）筑物清理。清理对象为清理范围内的建（构）筑物和易漂浮物，以及清理范围内大体积建筑物和构筑物残留体（如桥墩、牌坊、线杆、墙体等）。建筑物、构筑物清理后，残留高度不得超过地面0.5m，拆除的线材、铁制品、木杆不得残留库区。清理后的易漂浮材料，不得堆放在库区移民迁移线以下，且需有固定措施。田间和农舍旁堆置的柴草、秸秆等，残留量不应大于清理量的1/1000。③林木清理。清理对象为清理范围内各类林木，应尽可能齐地砍伐并清理外运，残余的枝丫、枯木、灌木丛以及柴草等易漂浮物应及时运出库外、就地烧毁或采取防漂措施。林木经清理后，残留树桩高度不得超过地面0.3m。④特殊清理由开发利用水库水域的兴办单位或项目法人报请水电工程项目业主和地方政府行业主管部门，取得批准后，按有关行业（专业）的技术要求进行清理。

kupen fangshen

库盆防渗 (seepage control of reservoir basin)

对水库库底和库周（通称库盆）局部或全部采用截断渗漏通道或延长渗漏途径，减小渗漏量的工程措施。抽水蓄能电站的水库库容一般较小，集雨面积很小，天然水量不大，发电用水主要来源于用电从下水库抽至上水库的水，故对水库有严格的防渗要求，见图。由于上、下水库间水头高、距离短，山体内又有地下洞室群相连通，上水库库水容易通过山体（库岸）、河床（库底）的陡倾角断层、裂隙等结构面渗漏，不仅损失水量，影响工程效益，而且影响地下洞室群，特别是地下厂房的结构安全，应予特别重视。



天荒坪抽水蓄能电站上水库

类型　按防渗范围有对坝体、坝基和库岸垭口及断层、裂隙密集带处理的局部防渗，对包括坝体、坝基在内的库周和库底全面防渗。按防渗材料有沥青混凝土面板、钢筋混凝土面板、土工膜、黏土铺盖、帷幕灌浆等。

沥青混凝土面板　一般采用简式结构，由整平胶结层、防渗层、封闭层组成。整平胶结层的作用是使护面与垫层结合良好，并为铺筑防渗层创造良好的施工条件，在防渗层和垫层之间起过渡作用，具有一定的透水性。防渗层要求有良好的防渗性、稳定性，以及能适应地基变形的良好柔性。边坡与库底连接部位一般采用圆弧过渡，并在整平胶结层上铺设5cm厚的高分子聚酯网起加筋作用。防渗层表面设置封闭层，封闭沥青混凝土防渗层的表面缺陷，提高面板的抗渗性能，避免沥青混凝土防渗层受紫外线、空气、水等外界不良环境的影响，延缓沥青混凝土防渗层老化。（见沥青混凝土防渗土石坝）

钢筋混凝土面板　库盆岸坡开挖坡度与坝坡相同，以便于垫层料填筑。面板厚度一般采用30cm等厚，面板下垫层采用80cm厚级配碎石，也有工程采用30cm厚无砂混凝土。设置垫层减少岩基对钢筋混凝土面板的约束，以免面板开裂，同时起排水反滤作用，防止面板下形成反压水头。（见混凝土面板堆石坝）

土工膜　常用于库底水平防渗，与坝及库岸钢筋混凝土面板组合成库盆综合防渗体。土工膜防渗具有防渗效果好、适应变形性能好、施工难度小、施工速度快、投资省等优点。土工膜防渗结构一般由下部支持层、土工膜防渗层和上部保护层组成。土工膜下部支持层包括过渡层和级配砂垫

层，有些工程还设置土工席垫。下部支持层的功能包括：①满足施工期与运行期传递荷载的要求；②有合适的粒径、级配，避免在高水压下土工膜被顶破；③保证土工膜下的排水通畅；④满足库底碾压石渣和土工膜之间填筑料层间反滤关系，以保证渗透稳定。上部保护层的作用为避免紫外线照射、高温、低温使土工膜老化，避免生物、坠落物、机械损伤土工膜。保护层常有压实黏土、砂砾石、预制或现浇混凝土板、浆砌块石或干砌块石，混凝土板、砌石与土工膜之间应设砂浆或泡沫塑料垫层。

黏土铺盖　一般用于库底覆盖层较深厚的低坝，与坝体、库岸沥青混凝土面板联合防渗。与坝身防渗体连接处的厚度应由渗流计算确定，且应满足构造和施工要求。库底黏土铺盖适应地基不均匀沉降的能力较强，因此，仅需对深厚覆盖层表层局部开挖并振动碾压或采取强夯措施密实即可。关键问题要重视黏土与沥青混凝土变形模量的差异，加强沥青混凝土防渗面板与库底黏土铺盖间的连接措施。主要措施有：①在沥青混凝土与黏土之间设置多条柔性止水，延长接触长度；②将沥青混凝土伸入黏土铺盖一定长度，斜坡段和水平段沥青混凝土间平顺连接，增强该部位适应不均匀变形的能力；③重视沥青混凝土与黏土铺盖连接区下部料物的级配设计，使各料层间满足反滤要求，一旦局部黏土铺盖开裂，能有条件采用抛土修补。

帷幕灌浆　坝基、库岸帷幕灌浆是库盆综合防渗措施的一部分。(见防渗帷幕、帷幕灌浆)

特点和要求　包括：①既要考虑防渗的可靠性，又要考虑防渗结构受每日一次甚至数次水位频繁骤升和骤降的重复荷载作用的特殊性及防治结构的经济性，还要考虑一旦防渗结构遭破坏后修复的便易性。②库岸的防渗护面兼有岸坡稳定防护功能。库盆防渗措施除了减少水量渗漏损失外，另一个重要作用是不恶化库周山体的水文地质条件，保持并加强库岸和库周山体的稳定。③根据库盆地基特性，尤其是建造在全强风化地基上的水库，要适应地基固结过程缓慢的特点，限制初期蓄水速率，加强渗水排除功能。④库盆地基的断层破碎带、软弱夹层带、变形特性有明显差别的软硬交接带容易造成防渗层受力不均匀而开裂破坏产生集中渗漏，应加固处理。⑤寒冷地区要防止结冰对防渗结构的破坏。⑥渗水如不加控制，不及时排除，会在坝体、库岸、库底、防渗护面下的孔隙中产生很大的水压力，应按不同部位设置相应的排水措施。全库盆防渗的水库，可按照排水分区设置、集中排出的原则，设置平铺排水、检查廊道等。

库盆防渗设计　主要步骤和内容：①通过地质勘察掌握库盆工程地质和水文地质条件。②库周山体的天然地下水位如果低于水库最高水位，就有向库外渗漏的可能性，应估算不对库盆和坝基采取防渗措施时的全库盆（包括坝基）渗漏水量，分析判断是否需要进行库盆防渗。③库盆防渗材料和防渗形式选择，包括钢筋混凝土面板、沥青混凝土面板、黏土铺盖（用于库底）以及土工合成材料等。④库盆防渗体结构设计，依据库水位最大变化速率设置防渗体后排水，核算坝、边坡稳定。⑤对自然条件比较复杂的库盆，建立工程区渗流模型分析计算初始渗流场，按照变化的补排关系分析运行期渗流场、渗透流量、地下水位线，研究其对周围建筑物的影响，确定工程措施。⑥设置库底排水观测廊道。

kua liuyu yinshui fadian

跨流域引水发电

(power generation with inter basin water diversion)　将一个流域的水量引至另一个流域进行水力发电。跨流域引水发电有两种方式：①利用相邻的两条河流之间天然水位差引水发电；②将相邻两条河流的水量集中于一条河流上建水电站。

相距较近而水位高程相差较大的两条河流，具有良好的水能开发条件，采取工程措施从海拔较高的河流引水至海拔较低的河流发电。例如中国的以礼河梯级水电站就是从金沙江支流以礼河引水至金沙江的支流小江发电。以礼河梯级水电站共有4级。在以礼河上建一座具有多年调节水库的一级（毛家村）水电站，在其下游即利用以礼河至小江高达1380m的落差建设二级（水槽子）、三级（盐水沟）、四级（小江）共3座水电站。以礼河梯级水电站总装机容量321.5MW，多年平均年发电量16亿kW·h。

有些相邻的河流流域面积均不大，径流量较小，若在两条河流上各自建设梯级水电站，则各个河流的水电站规模均较小。有时将水量集中于一条河流，建梯级水电站，以减少分别在两条河流上建水电站的工程量和投资。例如中国吉林省的第二松花江上游漫江和松江河流域面积分别仅为2781km^{2}和1900km^2，经过研究，确定了从漫江引水至松江河，集中两条河流的径流在松江河建水电站的方案，即在漫江的松山建水库（坝址以上流域面积为1302km^2），用隧洞引水至松江河的小山水电站水库，在松江河上建4座梯级水电站。

kuanweidun lianhe xiaonenggong

宽尾墩联合消能工

(combined dissipator with flaring pier gates)　将溢流表孔闸墩后段加宽或做成鱼尾状，再与其他消能形式组合的消能设施。有宽尾墩与消力池组合（见图1）、宽尾墩与消力戽组合、宽尾墩与挑流鼻坎组合等，适用于中高水头、大单宽流量、低弗劳德数条件。

基本原理　宽尾墩的作用是形成堰顶收缩水流。这种片状射流的顶部和两侧均为自由面，并在宽尾墩后坝面形成大面积无水区，当其沿坝面下泄时，受重力影响，水舌又逐渐坦化后进入消力池或戽式消力池，多股收缩射流在反弧附近交汇、混合，形成一种特殊的宽尾墩三元水跃。当宽尾墩与消力池组合时（见图2），这种水跃比常规的二元强迫（或自由）水跃和三元水跃，在水流内部产生了更为强烈的紊动剪切和掺混扩散，大大地提高了消能率。当宽尾墩下游具备戽流衔接条件的水深时，在反弧末端接长度约相当于第二共轭水深的平段，后接坡度为1∶1.5～1∶2.5的尾坎，使入池的多股射流在戽池内形成三元水跃的同时，利用缓

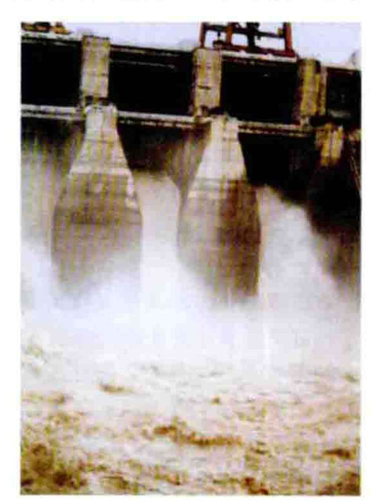


图1　宽尾墩联合消能工

坡尾坎将出池射流的主流挑至表面并与下游平顺衔接，形成“两滚一浪”的戽池流态，与典型的消力戽形成的“三滚一浪”相比较，具有涌浪低、水面波动小、消能率高的优点。

宽尾墩闸孔尺寸的收缩比（即墩尾表孔净宽与堰顶表孔净宽之比）一般取 1/3～1/2。

工程实例　安康水电站表孔采用宽尾墩消力池联合消能工，与平尾墩水跃消力池相比较，水跃第二共轭水深减小 15%，池长缩短 1/3，消能率提高了 80%。中国还有五强溪、桃林口、景洪、隔河岩等多项大中型工程采用。

岩滩水电站采用宽尾墩消力戽联合消能工，该工程坝高 110m，表孔单宽流量 266～308m^3/（s·m），尾水深达 46.2m，弗劳德数 $Fr=4.0\sim4.5$。经 1997 年 7 月泄流量 14 128m^3/s 时的原型观测，证明是成功的。中国还有水东、大朝山等工程采用。

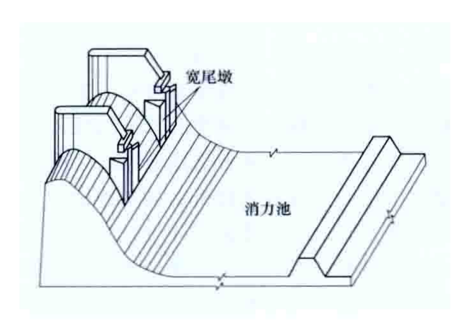


图 2　宽尾墩消力池联合消能工示意图

隔河岩水电站采用宽尾墩挑流鼻坎二级消力池联合消能工，该工程坝高 151m，最大泄流量 18 950m^3/s，溢流堰面最大流速达 30m/s，除中间孔外，其他表孔闸墩尾部呈不对称收缩体型，解决了拱坝坝身泄流向心集中的问题，1997 年 7 月下泄了 100 年一遇洪水，原型消能效果良好。

kuangzhafen

矿渣粉　(ground slag)

矿石经过选矿或冶炼后的残余物经干燥、磨细后的粉体。矿渣粉来源于粒化高炉矿渣、粒化电炉磷渣、钢渣等。粒化高炉矿渣是在高炉冶炼生铁时得到的，以硅酸盐与硅铝酸盐为主要成分的熔融物，经淬冷成粒；粒化电炉磷渣是在电炉法制黄磷时得到的以硅酸钙为主要成分的熔融物，经淬冷成粒；钢渣是采用转炉或电炉法炼钢产生的废渣经磁选除铁后的渣料。用于混凝土中作为掺合料的矿渣粉应达到相当细度且符合相应的活性指数。

检验矿渣粉的品质指标主要有密度、比表面积、SO_3 含量、含水量、活性指数、安定性、放射性等，其他技术指标，如游离氧化钙、流动度比、氯离子含量、烧失量等，随矿渣粉种类的不同略有区别。掺矿渣粉的混凝土与掺粉煤灰的混凝土性能类似，不仅有利于保护环境、节约水泥、降低混凝土水化热温升，而且能提高混凝土的抗裂性能，改善混凝土的耐久性。

矿渣粉作为水工混凝土的掺合料，掺量宜通过试验确定。对质量满足要求的磷渣粉，在水工常态混凝土中的掺量一般为 20%～50%，在碾压混凝土中的最大掺量在 65%以内。矿渣粉可单掺，也可和其他掺合料复合掺用。中国大朝山水电站大坝碾压混凝土采用磷渣粉与凝灰岩粉各 50%的复掺方案，索风营水电站大坝碾压混凝土采用磷渣粉与粉煤灰各 50%的复掺方案。

kuiba hongshui

溃坝洪水　(dam break flood)

大坝溃决造成的洪水。溃坝洪水具有突发性和来势汹涌的特点，其洪峰流量远大于暴雨或融雪形成的天然洪水，对下游工农业生产、交通运输及人民生命财产威胁极大，甚至造成毁灭性灾害。工程设计和运行中需要预估溃坝洪水对下游的影响，以便采取必要的措施，防范可能的风险，降低溃坝损失。

溃坝原因　概括为自然因素与人为因素两类。自然因素包括灾害性地震、特大洪水、库岸滑坡等；人为因素有勘探设计不周、坝基处理不当、施工质量不良、泄洪能力不足、运行管理不善以及战争破坏等。溃坝洪水的大小与坝的壅水高度、库容大小、溃口形态、溃坝过程有关。溃口形态分为全溃与局部溃，峡谷区的坝一般是全溃，丘陵平原区的坝一般较长，多为局部溃。溃坝过程分为瞬时溃与逐渐溃，一般混凝土坝多为瞬时溃，土坝和堆石坝多为逐渐溃。

溃坝洪水过程　溃坝初瞬坝上游水位陡降，形成逆流负波向上游传播，相应水量下泄，波形随时间逐渐展平；坝下游水位陡涨，形成顺流正波，常出现立波（不连续波），水急浪大，伴有波的折射、反射、叠加和漩滚以及强烈的泥沙运动；经过较长河段的槽蓄及河道阻力作用，立波不断衰减而消失。

瞬时溃坝最大流量出现在溃坝初瞬，其流量过程线成下凹形退水曲线，溃坝洪水波向下游传播的总趋势是不断坦化。逐渐溃坝最大流量一般出现在最终溃口形成的瞬时，当溃口尺寸相同时，渐溃最大流量要小于瞬溃的数值，且洪水过程线较瞬溃的平缓。

溃坝洪水计算　19 世纪和 20 世纪初已有人研究溃坝最大流量的计算，如瑞特（Ritter）、肖克利契（Schocklitsh）等就提出溃口最大流量计算公式。根据水量平衡推求溃坝流量过程线，然后进行下游河道演进计算的方法属于半经验半理论的简化计算方法。20 世纪四五十年代，Ré（1946）、Dressler（1954）等根据圣维南方程组（当瞬溃时加入立波公式）用特征差分或有限差分等数值计算求解。60 年代以来中国的溃坝洪水计算也有长足的发展，一方面对简化算法进一步完善，同时对详算法进行深入研究，山区河道一维不恒定流方法及平原区漫流溃坝的平面二维不恒定流溃坝洪水计算都已成功运用到工程规划和设计中。详算法可以从水库回水末端一直到水库下游边界作为一个整体进行计算，而不必如简算法那样分溃坝最大流量、坝址流量过程线及下游河道演进三步进行计算。

堤防溃决与溃坝机理是相似的，故溃坝洪水计算同样适用于堤防溃决洪水计算。

溃坝洪水的控制与减灾措施　防止溃坝首先应确保精心设计、严格施工、保证质量、完善运行管理。设计中应分析研究各种溃坝情况的洪峰到达时间及淹没范围，制定应急预案，建立预警系统。加强观测和预报，发现异常情况，及时降低库水位腾空库容，可有效减少溃坝最大流量及溃坝洪量。一旦出现溃坝险情，应及时预报，组织撤退转移，最大限度地降低灾害损失。

参考书目

电力工业部成都勘测设计院．水能设计．北京：电力工业出版社，1981.

Laxiwa Shuidianzhan

拉西瓦水电站 (Laxiwa Hydropower Station)

位于中国青海省贵德县与贵南县交界的黄河干流上，距西宁市134km，开发任务为发电。电站装机容量4200MW，多年平均年发电量102.23亿kW·h。以2回750kV输电线路接入西北电网，是“西电东送”北通道的骨干电源点。

水文和水库特性 坝址以上流域面积132 160km^2。坝址多年平均流量659m^3/s，多年平均年径流量208亿m^3。1000年一遇设计洪水流量4250m^3/s，相应库水位2452.00m；5000年一遇校核洪水流量6310m^3/s，相应库水位2457.00m，总库容10.79亿m^3；正常蓄水位2452.00m，相应库容10.06m^3；死水位2440.00m，调节库容1.5亿m^3，具有日调节能力。

坝址地形和地质 坝址区地震基本烈度为Ⅶ度，主要水工建筑物按8度设防。坝址区无大的深切冲沟，两岸坝肩山体雄厚，坝址两岸岩体以块状结构的花岗岩为主，断裂、裂隙较为发育。坝址区为高应力地区，呈现钻孔饼状岩心较多，平洞洞壁岩石片状剥落和轻微至中等岩爆等现象。

枢纽布置 枢纽工程由大坝、泄水建筑物、引水发电系统等组成，见图1。

大坝　双曲拱坝，坝顶高程2460.00m，最大坝高250m，拱冠梁坝底厚度49m，顶拱中心线弧长459.6m，见图2。

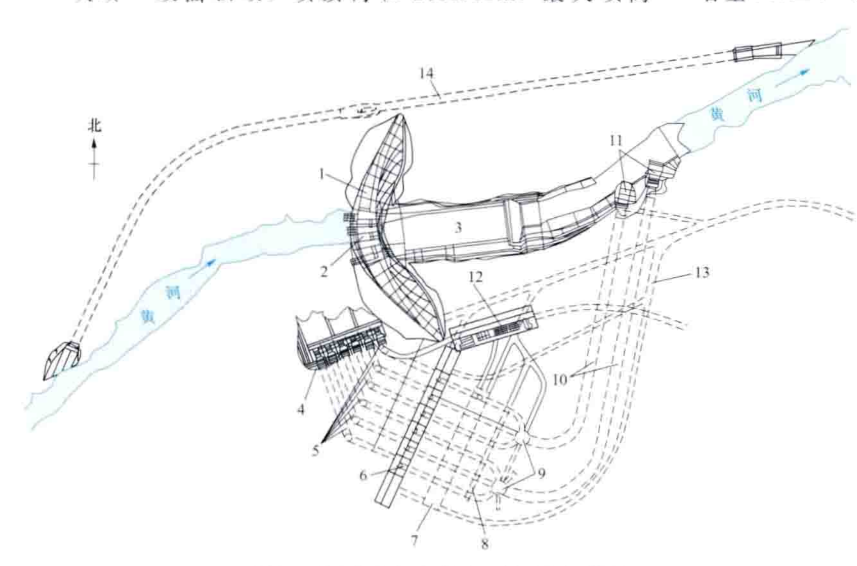


图1　拉西瓦水电站枢纽平面布置图

1—拱坝；2—泄洪表孔；3—水垫塘；4—进水塔；5—引水管；6—地下厂房；7—主变压器室；8—尾闸室；9—尾水调压室；10—尾水洞；11—尾水渠；12—出线站；13—进厂路；14—导流洞

泄水建筑物　有3个坝身表孔、2个深孔及2个临时底孔。表孔单孔宽13m，堰顶高程2442.50m，设计和校核洪水位时总泄量分别为2051m^3/s和4143m^3/s；深孔进口高程2371.80m，出口挑坎高程2362.00m，孔口尺寸5.5m×6m，设计和校核洪水位时总泄量分别为2285m^3/s和2356m^3/s；临时底孔进口高程2320.00m，孔口尺寸4m×6m，最大挡水水头110～137m，单孔最大泄量948m^3/s。各泄水孔均采用挑流，下游水垫塘为反拱型。

图2　拉西瓦水电站大坝

引水发电系统　厂房为右岸中部式地下厂房，主副厂房、安装间呈一字形布置，主安装间布置在厂房右端头。主厂房、主变压器-开关室及尾水调压室三大洞室平行布置，主变压器-开关室位于主厂房下游。压力引水管道为全地下埋管，内径9.5m。尾水系统为“三机一室一洞”布置形式，两个独立的圆形尾水调压室直径均为28m，尾水洞直径17.5m。主厂房内设6台700MW的混流式水轮发电机组。水轮机转轮直径6.9m，转速142.9r/min，额定出力711MW。水轮发电机为立轴半伞式，额定电压18kV，额定容量757MV·A，额定功率因数0.925。发电机与变压器的组合方式采用联合单元接线，750kV侧采用3/2断路器接线；6组三相组变压器，额定容量3×260MV·A，布置在主变压器-开关室底层；750kV配电装置采用SF_6气体绝缘金属封闭开关设备，布置在主变压器-开关室上层。

工程施工 采用全年断流围堰，左岸隧洞导流，基坑全年施工的导流方式。工程于2006年正式开工，2009年5月首批两台机组同时并网发电，2010年除预留一台近期不安装的机组外，已安装的5台机组全部并网发电。

主要工程量：石方开挖795.71万m^3，混凝土浇筑368.18万m^3，钢筋、钢材及金属结构12.32万t。

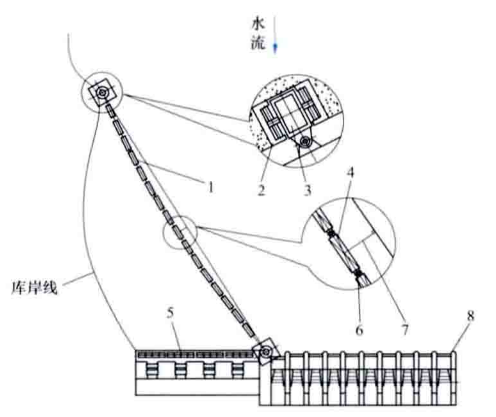
设计单位 中国水电顾问集团西北勘测设计研究院。

建设单位 中国电力投资公司黄河上游水电开发有限责任公司。

lanwupiao

拦污漂 （debris guard; trash retaining float） 阻拦库区漂浮物进入特定水域的水面浮式设施。多设于水电站机组进水口拦污栅之前，以减少栅前的污物，是水库坝前漂浮物综合治理措施之一。一般由端部支承埋件、端部支承浮箱、漂体、漂体连接件或漂体固定件等组成，如图所示。

拦污漂布置原则：①能有效阻拦漂浮物进入进水口拦污栅前水域；②有利于漂浮物的后续处理；③有利于减小拦污漂结构受力。常用的拦污漂布置方式为一端布置在机组进水口与挡水（溢流）坝之间的坝段上，另一端布置在机组进水口侧的库岸，其轴线与泄洪水流方向的夹角尽量小，长度尽量短。当河谷比较开阔时，也可设置河中固定墩，以减小栏污漂长度。拦污漂轴线一般呈垂链线（水平面内）布置，垂链线的矢高越大，拦污漂两端导槽结构所受的横向反力越小。



拦污漂示意图

1—拦污漂；2—端部支承埋件（导槽）；3—支承浮箱；4—漂体；5—进水口；6—漂体连接件；7—矢高；8—溢流坝

拦污漂由多个漂体连接组成，漂体可以是钢结构浮箱、钢筋混凝土趸船、泡沫塑料甚至废旧汽油桶，漂体之间常采用钢丝绳串连、铰接等方式连接。为适应库水位的变化，拦污漂的两端常固定在可沿导槽上下浮动的浮箱上。当库水位变幅较小时，库岸一端也可做成固定式结构。为了增加水下拦漂面积，还可在漂体下部设置挂栅（网）。

云南省金沙江龙开口水电站进水口拦污漂总长736m，已成功投运，澜沧江糯扎渡水电站临时拦污漂长780m。

lanwushan

拦污栅 （trash rack） 拦阻水流中的污物进入流道的设施。拦污栅多设于水电站进水口、船闸输水廊道进水口、抽水蓄能电站进（出）水口。拦污栅由栅叶和栅槽组成。栅叶通常做成活动式，便于提出孔口清理或检修。栅槽埋固在混凝土中，栅叶拦阻污杂物形成的水位压差通过支承部件传递至栅槽和土建结构。

常规水电站进水口的过栅流速一般控制在1m/s左右。在平面上可布置成直线形、扇状多边形和环状多边形等；在立面上有垂直式和倾斜式，一般多用垂直式，倾斜式只适用于低水头水电站的进水口。当进水口孔数较多时，常将栅后的各进水口做成连通式，以提高水能利用率，这时需设置前后两道栅槽，并配置至少一扇备用栅，以方便拦污栅的不停机清污和检修。

拦污栅的栅条间距视污物大小、数量及具体工程的要求而定，既不宜过大，以保证通过栅叶的污物不会卡在水轮机过流部件；也不宜过小，以尽量减少污物堵塞而引起的水头损失。拦污栅的设计荷载视污物性质、数量及清污措施而定，常规水电站进水口拦污栅一般按栅叶前后2～4m水压差设计，特殊情况可适当加大。

抽水蓄能电站上、下水库进（出）水口的拦污栅，在双向水流的条件下运行，出流时过栅流速的分布极不均匀，故结构强度及刚度要求均高于常规水电站进水口拦污栅，一般按5m水压差或更大进行设计，并应优化栅叶各构件断面形体，使其有较好的抗振特性，栅叶与栅槽的配合尽可能按固端连接，以提高栅叶的固有频率，避免发生共振，需对拦污栅进行振动特性分析和稳定验算。

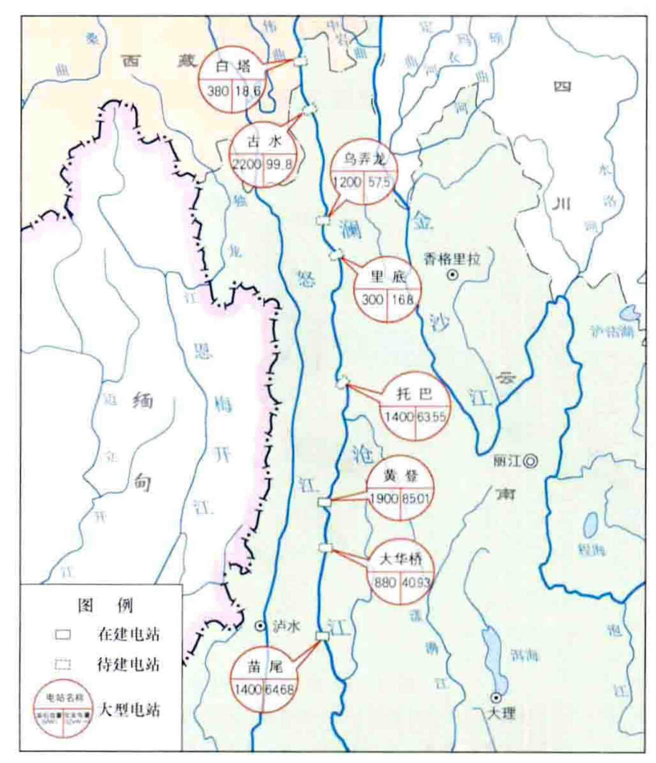
船闸输水廊道进水口的拦污栅，过栅流速可相对较大，设计水压差的取值一般也较水电站进水口拦污栅大。

Lancang Jiang shangyou shuidian guihua

澜沧江上游水电规划 （hydropower development planning of the upper reaches of Lancang River） 澜沧江上游水电规划分为澜沧江上游西藏境内河段、古水至苗尾河段两段进行。

根据国家发展和改革委员会水电前期工作安排，澜沧江上游西藏境内河段水电规划工作正在开展。

根据云南省人民政府和西藏自治区人民政府联合批复的《澜沧江上游古水至苗尾河段水电规划报告》（云政发〔2007〕182号），澜沧江上游古水至苗尾河段梯级开发方案为古水、乌弄龙、里底、托巴、黄登、大华桥、苗尾7级水电站，见图。根据水电水利规划设计总院印发的《澜沧江古水河段开发方式研究专题报告审查意见》（水电规规〔2011〕



澜沧江上游河段梯级水电站布置图及开发现状

97号），原古水一级开发调整为白塔、古水两级开发。该河段规划电站8座，总装机规模为9210MW，平均年发电量416.3亿kW·h。

澜沧江发源于青藏高原唐古拉山北麓青海省杂多县，上游称扎曲，在西藏昌都汇入昂曲后始称澜沧江。澜沧江流经青海、西藏、云南，于西双版纳州南腊河口流出国境，出国境后称湄公河，经老挝、缅甸、泰国、柬埔寨、越南后注入南海。中国境内澜沧江流域面积约17.4万km^2，干流全长2153km（含主源扎曲）。澜沧江上游干流河长约792km，天然落差1908m。

澜沧江上游干流梯级的开发任务主要是发电。澜沧江上游梯级水电站除可供给西藏、云南部分电力外，将主要送电至中国缺少能源的华中、华东和南方地区，是“西电东送”的主要战略能源基地之一。

古水、黄登等梯级也具有一定的调节能力，调节库容分别为6.72亿、8.28亿m^3。澜沧江上游规划的梯级电站还没有建成发电的，乌弄龙、里底、托巴、黄登、大华桥、苗尾水电站正在开展可行性研究阶段的勘测设计工作，总装机规模7030MW；其余梯级正在开展预可行性研究阶段的勘测设计工作。

Lancang Jiang shuixi shuineng ziyuan

澜沧江水系水能资源　（hydropower resources of Lancang River System）　根据《中华人民共和国水力资源复查成果（2003年）》统计，澜沧江水系中国境内水能资源理论蕴藏量为3144.04亿kW·h/a，占中国水能资源的5.17%；技术可开发资源1690.33亿kW·h/a，占中国水能资源的6.83%。澜沧江流域呈条带状，支流短小，干流长且落差大，所以水能资源集中在干流。

澜沧江发源于中国青藏高原唐古拉山北麓的青海省杂多县，自西北向东南流，经西藏流入云南，在云南省境内的流向基本上为自北向南，于西双版纳傣族自治州流出中国，出中国后称湄公河，经老挝、缅甸、泰国、柬埔寨、越南等国，在越南西贡市注入太平洋的南海。湄公河流域面积74.4万km^2，干流全长约4500km，落差5060m，多年平均年径流量4750亿m^3。

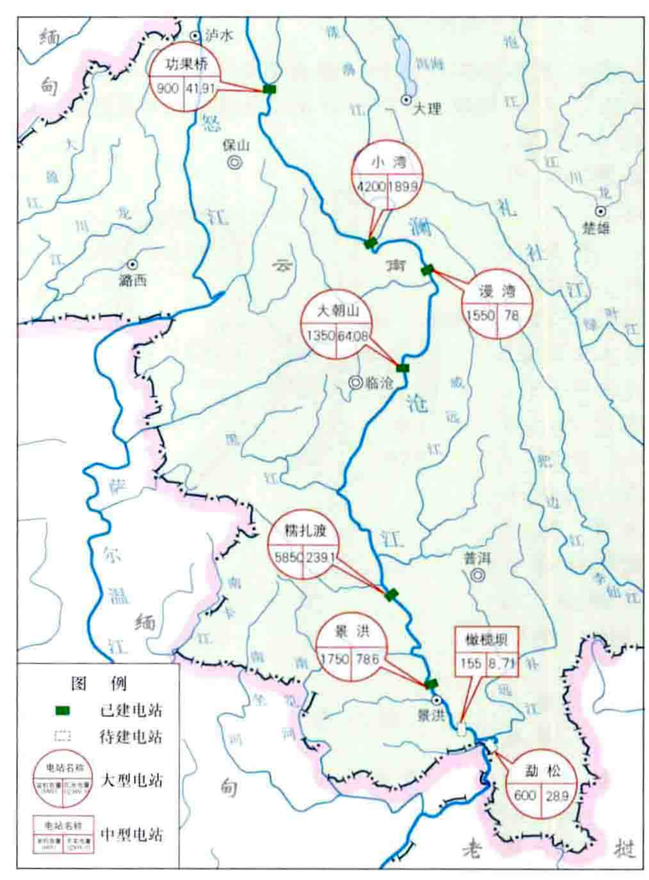
澜沧江径流充沛、落差巨大，水能资源丰富。澜沧江可开发水能资源主要集中在干流上。干流技术可开发装机容量32 400.4MW，多年平均年发电量1570.17亿kW·h，分别占本水系技术可开发量的93%和92.9%；支流技术可开发装机容量2439.6MW，多年平均年发电量120.16亿kW·h，分别占本水系技术可开发量的7%和7.1%。

澜沧江技术可开发电站以大型水电站为主。本水系大型水电站18座，装机容量31 175MW，多年平均年发电量1504.87亿kW·h，分别占技术可开发量的89.5%和89%；18座大型水电站中，1000MW以上的电站14座，装机容量28 625MW，多年平均年发电量1368.97亿kW·h，分别占大型水电站的92.1%和91.1%；最大的水电站为糯扎渡水电站，装机容量5850MW，多年平均年发电量239.92亿kW·h。澜沧江水能资源主要集中在云南省，共有装机容量27 489.5MW，多年平均年发电量1294.84亿kW·h，占本水系的79%、76.6%；其次为西藏自治区，共有装机容量6362.1MW，多年平均年发电量346.24亿kW·h，占本水系的18.3%、20.5%；再次为青海省，共有装机容量988.4MW，多年平均年发电量49.25亿kW·h，占本水系的2.8%、2.9%。

Lancang Jiang zhong-xiayou shuidian guihua

澜沧江中下游水电规划　（hydropower development planning of the middle and lower reaches of Lancang River）　根据1987年中国原水利电力部批复的《澜沧江中下游河段规划报告》，澜沧江中下游河段按8级开发，自上而下分别为功果桥、小湾、漫湾、大朝山、糯扎渡、景洪、橄榄坝、勐松，见图。

澜沧江中下游河段全长780km，天然落差827m。澜沧江中下游梯级电站的开发任务以发电为主，兼顾灌溉与供水、防洪、航运、环境保护等综合利用效益。澜沧江中下游地质条件较好，水库淹没损失小，宜于建高坝大库、大型水电站，技术经济指标优越，可作为大规模能源输出基地。澜沧江中下游总装机规模16 460MW，多年平均年发电量733.21亿kW·h，小湾和糯扎渡水电站均有多年调节水库，调节库容分别为98.95亿、113.35亿m^3，从而使各梯级水电站供电质量高，年保证电量为多年平均年发电量的88.42%，且年内分配较均匀。



澜沧江中下游河段梯级水电站布置图与开发现状

澜沧江中下游8座水电站中只有橄榄坝和勐松2座水电站尚未建设，小湾、漫湾、大朝山、糯扎渡、景洪、功果桥6座水电站已经建成发电。

Ledingdun Choushui Xuneng Dianzhan

勒丁顿抽水蓄能电站 （Ludington Pumped Storage Power Station） 位于美国东北部密执安湖东岸，距勒丁顿市 9.4km，装机容量 1872MW，见图 1。用 345kV 输电线路接入密执安电力系统。2012 年开始对机组进行升级改造，将增加出力 300MW，总装机容量达到 2172MW。

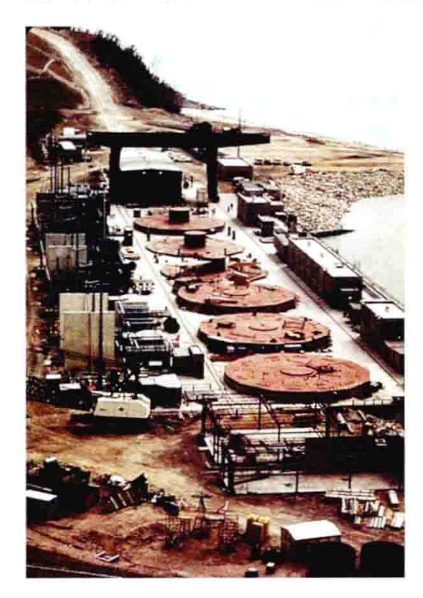


图 1 勒丁顿抽水蓄能电站

枢纽布置 枢纽工程由上水库、下水库、水道系统、厂房等组成，见图 2。

上水库和下水库 上水库用土堤围成，水库面积 3.4km²，正常蓄水位 287.00m，相应库容 1.02 亿 m³，消落深度 20m，调节库容 6660 万 m³，可进行周调节。下水库利用天然的密执安湖，平均湖水位 176.80m。上、下水库之间的净水头为 110m。

上水库围堤长 9.6km，堤顶高程 290.00m，最大堤高 52m，内外边坡坡度均为 1∶2.5。填筑土方 2880 万 m³。土堤的迎水面用沥青混凝土护面，面积 60 万 m²。

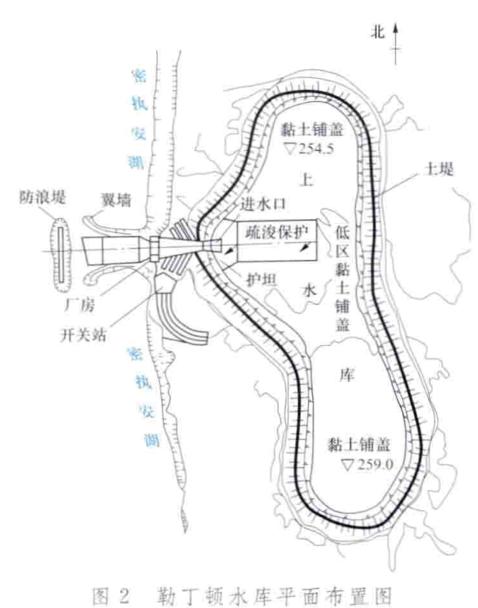


图 2 勒丁顿水库平面布置图

水道系统 进水口设防旋涡和防冰凌设施。进水闸 6 孔，各宽 8m、高 8m。采用一管一机供水方式。压力钢管穿过土堤部分，长 150m，外包混凝土。下接斜管段长 246m，埋在砂内。管径由 8.5m 变至 7.3m，管壁厚由 12.7mm 增至 36.5mm。引水道长 396m。

厂房 露天式，长 176m，宽 52m，高 32m。厂内安装 6 台可逆式混流机组。厂房建筑大部分在地面以下，厂房顶高出平均湖水位 6.1m。主变压器设在厂房后面，开关站位于厂房左侧。尾水渠建有 2 条深入湖内的翼墙，长 500m。离翼墙末端 340m 处，还设有 1 道垂直于尾水渠的防浪堤。

水泵水轮机的转轮直径 8.23m，是世界上已有转轮最大的抽水蓄能机组。水泵水轮机的安装高程低于平均湖水位 8m。水泵工况，抽水扬程 93～114m，单机最大抽水流量 315m³/s，6 台机组的抽水能力共达 1890m³/s。发电工况，水头 87～108m，水轮机额定出力 312MW，最大出力 343MW。发电电动机容量为 325～388MV·A，转速 112.5r/min，功率因数 0.85，电压 20kV，频率 60Hz。不抽水不发电时，可作同步调相机用。机组更新后单机容量为 362MW，转轮直径 8.4m，重 260t。

工程施工 工程于 1969 年 4 月开工，1973 年 1 月第一台机组投运，1974 年 1 月竣工。2012 年起对机组进行升级改造，改造工作包括更换 6 个转轮和升级发电等辅助设备，第一台机组 2013 年投产，全部工作将于 2019 年完成。

主要工程量和投资：土石方开挖 543 万 m³，土石方填筑 2987 万 m³，混凝土浇筑 40 万 m³。总造价包括施工期利息等间接费用共 3.09 亿美元，单位投资 165 美元/kW（1974 年价格）。更新改造工作总投资 8 亿美元。

leiguan

雷管 （detonator） 用来引爆炸药的爆破器材。雷管内装的起爆药是对一般冲击（如打击）和加热具有很高敏感度的炸药。起爆药爆炸时，能产生起爆冲能而引爆其他炸药。19 世纪 60 年代瑞典化学家 A.B. 诺贝尔（Alfred Bernhard Nobel，1833－1896）发现硝化甘油能用雷汞引爆，雷汞即广泛地用于雷管生产。雷管因最初管内仅装雷汞而得名。

工业雷管是用金属、纸或塑料制成的小管，由管壳，正、副起爆药及加强帽构成。副起爆药压装在雷管底部，起爆炸作用。正起爆药压装在副起爆药上面，起诱爆副起爆药的作用。顶部用铜质加强帽压盖住，加强帽中心开有直径为 2mm 的小圆孔，以提高压装高敏感度起爆药的安全性，降低雷管使用时的危险性，并在一定程度上保护起爆药不受潮，提高爆炸威力。雷管底部加工成球形或锥形窝穴，起雷管爆炸波的聚能作用。

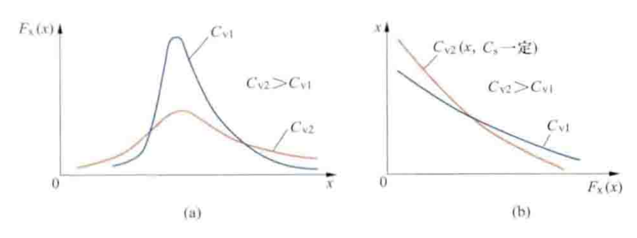
工程爆破中常用的工业雷管有火雷管、电雷管、导爆管雷管等。电雷管又分普通电雷管、磁电雷管、数码电子雷管，在普通电雷管中又有瞬发电雷管、秒与半秒延时电雷管和毫秒延期电雷管等。数码电子雷管和磁电雷管是新发展起来的品种，代表着工业雷管的发展方向。

licha xishu

离差系数 （coefficient of variation） 表示变量概率分布函数离散程度的指标。又称变差系数。离差系数用符号 C_v 表示，其计算公式为

$$C_v = \frac{\sigma}{\bar{x}} = \frac{1}{\bar{x}}\left[\int_{-\infty}^{\infty}(x-\bar{x})^2 f_x(x)\mathrm{d}x\right]^{1/2}$$

式中 C_v 为概率分布的标准差 σ 与 $\bar{x}$ 均值的比值。C_v 值较大，则系列的离散程度较大，即系列中各项的值同均值相差较大；C_v 值较小，则系列的离散程度较小，即系列各项的值同均值相差较小。C_v 值对概率密度函数 $f_x(x)$ 及概率分布函数 $F_x(x)$ 的影响见图。



C_v对密度曲线和分布曲线的影响

(a) C_v对密度曲线的影响；

(b) C_v对分布曲线的影响

水文系列的C_v值的大小与气候、控制断面的集水面积及河流补给状况有关。中国的雨量和径流的C_v值的分布，大致是南方小北方大，沿海小内陆大，年雨量的C_v值一般为0.15～0.7，年径流的C_v值一般为0.2～1.0，个别地区也有超过1.0的，一般随流域面积增加而减少。洪水C_v值为0.21～1.90，一般随历时而递减。

Lijiaxia Shuidianzhan

李家峡水电站 (Lijiaxia Hydropower Station)

位于中国黄河干流上游青海省尖扎县和化隆县的交界处，距兰青铁路平安驿车站78km。工程开发任务以发电为主，兼顾灌溉，见图1。装机容量2000MW，多年平均年发电量59亿kW·h，第一期工程装机容量1600MW。水电站以5回330kV输电线路接入西北电力系统，供电青海、甘肃、陕西和宁夏4省区。



图1 李家峡水电站

水文和水库特性 坝址以上流域面积13.7万km^2，多年平均流量664m^3/s，多年平均年径流量209.4亿m^3。经龙羊峡水库调节后，1000年一遇设计洪水流量4940m^3/s，10 000年一遇校核洪水7220m^3/s，总库容17.5亿m^3，正常蓄水位2180.00m，死水位2178.00m，调节库容0.6亿m^3，具有日调节性能。

坝址地形和地质 坝址地震基本烈度为Ⅶ度，大坝按8度设防。坝址为V形河谷，两岸地形基本对称。左坝肩冲沟发育，山体单薄，呈三面临空形态。右岸山体较雄厚。坝址基岩为前震旦纪条带状混合岩夹片岩，并有伟晶花岗岩脉穿插。层状变质岩岩层倾向上游偏右岸，倾角40°～50°。新鲜基岩质地坚硬，完整性好。坝址区扭性、扭张性高倾角的顺河断层和层间挤压破碎带较发育。坝址右岸上游Ⅰ号切层滑坡，左岸上游Ⅱ号顺层滑坡和下游左岸Ⅲ号滑坡对工程影响较大。Ⅰ号滑坡690万m^3，采用上部开挖卸荷和弃渣压脚的处理措施。Ⅱ号滑坡1840万m^3，对稳定性差的下游地段采用上部开挖卸荷处理。Ⅲ号滑坡位于出线站和下游消能区的左岸，总方量390万m^3，其中Ⅲ-1号滑坡在施工中局部坍滑，后期利用膜袋混凝土和锚索、锚杆进行了加固和保护。

枢纽布置 枢纽工程由大坝、泄水建筑物、厂房等组成，见图2。

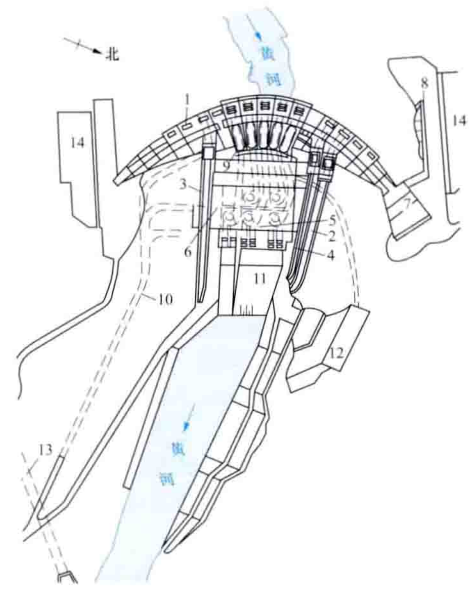


图2 李家峡水电站枢纽平面布置图

1—拱坝；2—左中孔；3—右中孔；4—左底孔；5—主厂房；6—安装间；7—重力墩；8—左岸副坝；9—坝后背管；10—进厂交通洞；11—尾水渠；12—出线站；13—导流洞；14—缆机平台

大坝 混凝土双曲拱坝，坝顶弧长414.4m，坝顶高程2185.00m，最大坝高155m，最大底宽46m。左岸2157m以上为重力墩，拱坝左、中、右三圆弧最大中心角和半径分别为19.95°、56°、22.03°和408、145、408m。

泄水建筑物 左右岸各设1条中孔泄水道，弧门尺寸均为8m×10m，进口底坎高程2120.00m，泄槽水流最大流速40m/s，设计流量2190m^3/s，校核流量2210m^3/s。左岸设1条底孔泄水道，弧门尺寸为5m×7m，进口底坎高程2100.00m，设计泄流量1100m^3/s，校核泄流量1120m^3/s。中、底孔泄水道均采用窄缝式挑流鼻坎。

左、右岸灌溉渠道进水口设于坝身，进口底坎高程2170.00m，设计引水流量分别为5m^3/s和3m^3/s。

厂房 采用坝后背管引水，钢管直径8.0m，进口底坎高程2130.00m，厂内设置5台容量为400MW的混流式水轮发电机组，采用双排机布置形式（前2后3），设计水头122m，最大水头135.6m，最小水头114.5m。水轮机转轮直径6.15m，转速125r/min。安装间布置在厂房的右侧。5台450MV·A、330kV三相组合式变压器，330kV气体绝缘金属封闭电器布置在厂坝间。

工程施工 采用河床一次断流，左岸隧洞导流基坑全年施工的导流方式。导流标准按龙羊峡水库调节后20年一遇洪水设计。工程于1988年4月正式开工，1997年2月第一台机组投产，1999年一期工程竣工。

主要工程量：土石方开挖328万m^3，土石方填筑17.5万m^3，混凝土浇筑254万m^3，钢筋、钢材及金属结构约8.8万t。

设计单位 西北勘测设计研究院（现中国水电顾问集团西北勘测设计研究院）。

lilun lixue

理论力学 (theoretical mechanics) 采用经过科学抽象的力学模型（质点、刚体等）研究物体机械运动一般规律的力学分支学科。理论力学包括静力学、运动学和动力学3部分。物体的相对位置随时间变化称为机械运动，其变化量称为位移，位移对时间的变化率称为速度。理论力学的研究对象只限于速度远小于光速的宏观物体，并根据不同情况抽象为质点（只有位置，没有大小，但具有质量）、质点系或刚体（特殊的质点系，各质点之间距离不变）。理论力学是天体力学、流体力学、结构力学和材料力学等学科的基础，在科学研究和生产实践中占有重要地位。

力 物体间的相互作用，是引起物体运动状态变化或产生形变的原因。物体的质量 m 与其运动速度 v 的乘积称为动量。动量对时间的变化率 $\mathrm{d}(mv)/\mathrm{d}t$ 与所受的力 F 成正比。选取质量、长度、时间和力的单位分别为kg、m、s和N，则有 $F=\mathrm{d}(mv)/\mathrm{d}t$，这就是I. 牛顿（I. Newton，1643－1727）第二定律。它与惯性定律、作用与反作用定律、力的合成中的平行四边形法则、刚化原理、二力平衡原理、增减平衡力系公理和万有引力定律等构成理论力学的研究依据。

静力学 研究物体的静止和力系平衡的规律。任何平衡和静止都是相对的，通常取地球为参照体，相对于地球为静止的状态称为静止状态。在一个静止物体上施加一个力系后，此物体仍保持静止，则称此力系为平衡力系。一个力系是平衡力系的充分必要条件是力系的主向量和主矩均为零。在研究杆件的截面内力和流体平衡等问题时，经常要用到静力学。（见材料力学）

运动学 只分析物体如何运动，并确定合适的方法去描述运动，而不考虑运动状态变化的原因。研究质点的运动时，内容有参考系、运动方程、速度、加速度和轨迹等，不考虑质点的自身旋转。研究刚体运动时，内容有平动、转动、复合运动和瞬时转动中心等。运动学是复杂机械设计与研究的重要基础。

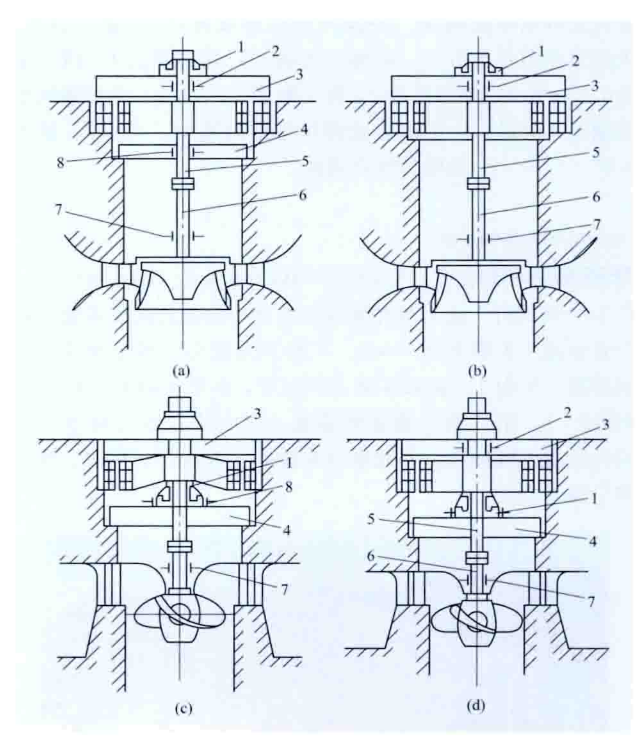
动力学 见动力学。

lishi shuilun fadianji

立式水轮发电机 (vertical hydro-generator) 转轴与地面垂直布置的水轮发电机。具有定子机座结构简单、占地面积小、垂直高度高等特点。按照轴承布置位置的不同，立式水轮发电机可分为悬式和伞式两类，见图。

悬式水轮发电机 推力轴承位于转子上部的水轮发电机。推力轴承布置在上机架的中心体内或上机架上部，全部转动部分的重量及水推力通过上机架支臂传到定子机座到混凝土基础上。其优点是径向机械稳定性较好，轴承损耗小，维护检修方便，多用于中、高速机组。图（a）所示为带下机架的悬式水轮发电机，图（b）所示为不带下机架的悬式水轮发电机。

伞式水轮发电机 推力轴承位于转子下部的水轮发电机。推力轴承可以布置在下机架的中心体内或下机架上部，也可以布置在水轮机顶盖上。按导轴承设置位置，伞式水轮发电机又可分为全伞式和半伞式两种：推力轴承以上部位无导轴承的为全伞式水轮发电机，见图（c）；上部有导轴承的为半伞式水轮发电机，见图（d）。伞式机组的优点是结构紧凑，总高度比悬式低，因而可以降低厂房高度，减轻机组重量；但因推力轴承直径大，轴承损耗比悬式机组的大；伞式机组还可以减轻上机架的重量，不拆卸推力轴承即可吊出转子，多用于中、低速大容量机组。但随着设计、制造、安装技术的进步和发展，以及对发电机结构部件刚度、强度及轴系进行更准确的有限元分析计算，大容量高转速机组广泛采用具有上、下导轴承的半伞式结构。



立式水轮发电机组结构形式

(a) 悬式带下机架；(b) 悬式不带下机架；
(c) 全伞式；(d) 半伞式

1—发电机推力轴承；2—发电机上导轴承；3—发电机上机架；4—发电机下机架；5—发电机转轴；6—水轮机主轴；7—水轮机导轴承；8—发电机下导轴承

结构形式选择 主要视定子铁芯内径（D_i）与定子铁芯高度（l_t）和机组额定转速（n_N）乘积的比值而定。

中国已设计、制造的单机额定容量最大的悬式水轮发电机容量为343MV·A，安装于白山水电站；1995年中国通过技贸结合、技术转让国际招标方式，2003年投产发电的三峡水电站机组为当时单机额定容量最大的半伞式水轮发电机，最大容量为840MV·A，定子机座外径21.42/20.9m、飞轮力矩450 000t·m^2、推力负荷5200t、转子重达1780t。2012年投运的世界单机额定容量为833MV·A、最大容量水轮发电机为889MV·A的半伞式发电机装在向家坝水电站，是中国设计制造的结构尺寸最大的立式水轮发电机。表中为部分大容量典型立式水轮发电机的主要技术数据。

部分大容量典型立式水轮发电机的主要技术数据

电站名称	国别	额定容量 (MV·A)	结构形式	额定电压 (kV)	额定功率因数	额定转速 (r/min)	飞逸转速 (r/min)	短路比	飞轮力矩 (t·m²)	推力负荷 (kN)	定子铁芯内径 (m)	定子铁芯高度 (m)	质量 (t)	冷却方式
伊泰普	巴西 巴拉圭	824 737	半伞	18 18	0.85 0.95	90.9 92.3	170 170	1.18	328 000 320 000	40 180 39 200	16 16	3.50 3.26	3548 3381	半水冷
大古力	美国	718	全伞	15	0.975	85.7	158	1.35	356 000	46 060	18.79	2.13	3000	半水冷
萨扬-舒申斯克	俄罗斯	711	半伞	15.75	0.9	142.8	280		102 000	31 850	11.85	2.75	1860	半水冷
古里	委内瑞拉	700	半伞	18	0.9	112.5	215	1.1	155 000	26 137	13.70	3.80	2440	空冷
邱吉尔瀑布	加拿大	500	半伞	15	0.95	200	330		33 500	16 660	9.05	3.01	1090	空冷
龙羊峡	中国	356	半伞	15.75	0.9	125	256	1.122	85 000	22 246	11.85	2.60	1670	空冷
刘家峡	中国	343	半伞	18	0.875	125	250	0.84	53 000	15 435	11.91	1.60	1296	半水冷
葛洲坝	中国	194.2	半伞	13.8	0.875	54.6	120	1.56	172 000	37 240	16.99	2.00	1635	空冷
白山	中国	343	悬式	18	0.875	125	260	1.114	70 000	17 640	11.34	2.75	1480	空冷
李家峡	中国	444	半伞	18	0.9	125	246	1.12	85 000	25 284	11.74	3.2	2165	空冷 蒸发
二滩	中国	612 642	半伞	18	0.9 0.95	142.9	279	1.12	95 000	21 756	11.81	2.883	1788	空冷
三峡左岸	中国	778	半伞	20	0.9	75	150	1.2	450 000	47 530 54 096	18.5 18.8	3.13 2.95	3143 3333	半水冷
三峡右岸	中国	778	半伞	20	0.9	71.4	143	1.2	450 000	54 096	18.8	3.15	3446	半水冷
三峡地下	中国	778	半伞	20	0.9	75 75 71.4	151 146 143	1.2	450 000	53 606 39 690 51 842	18.76 18.5 18.8	3.2 3.13 3.14	3552 3485 3446	空冷 蒸发 半水冷
龙滩	中国	778	半伞	18	0.9	107.1	214	1.11	220 000	35 280	15	3.3	3028	空冷
拉西瓦	中国	757	半伞	18	0.925	142.9	255	1.05	131 000	25 600	12.6	3.25	2450	空冷
瀑布沟	中国	667	半伞	20	0.9	125	260	1.1	135 000	28 420	13.2	3.05	2300	空冷
小湾	中国	778	半伞	18	0.9	150	286	1.1	110 000	26 460	11.6	3.65	2560	空冷
糯扎渡	中国	722.3	半伞	18	0.9	125	250	1.1	175 000	31 500	13.43	3.3	2610	空冷
		722.3	半伞	18	0.9	125	250	1.1	170 000	30 380	13.5	3.2	2695	空冷
构皮滩	中国	666.7	半伞	18	0.9	125	250	1.1	130 000	28 841	12.9	3.3	2523	空冷
		666.7	半伞	18	0.9	125	250	1.1	131 500	29 430	12.9	3.0	2320	空冷
景洪	中国	388.9	半伞	18	0.9	75	150	1.184	218 000	30 870	18.13	1.8	2200	空冷
官地	中国	667	半伞	20	0.9	100	190	1.05	220 000	29 430	15.0	3.1		空冷
锦屏一级	中国	700	半伞	20	0.925	142.9	270	1.05	116 000	25 506	12.0	3.25	2465	空冷
锦屏二级	中国	666.7	半伞	20	0.9	166.7	300	1.06	82 828	20 404	10.87	3.33	2360	空冷
溪洛渡左岸	中国	770	半伞	20	0.9	125	240	1.05	180 000	33 320	14.2	3.35	3178	空冷
溪洛渡右岸	中国	770	半伞	20	0.9	125	224	1.05	190 000	36 456	13.8	3.3	2750	空冷
向家坝左岸	中国	833	半伞	20	0.9	75	150	1.06	490 000	51 500	19.41	3.25	3797	空冷
向家坝右岸	中国	833	半伞	23	0.9	71.4	134	1.05	490 000	44 200	18.8	3.55	3793	空冷

liqing hunningtu fangshen tushiba

沥青混凝土防渗土石坝 (embankment dam with asphalt concrete sealing) 以沥青混凝土为防渗面板或心墙的土石坝。土石坝用沥青混凝土防渗始于20世纪30年代，其优点是防渗性能好，适应变形能力强，耐化学侵蚀和溶蚀，工程量小，易于施工。全世界已建成沥青混凝土防渗土石坝及蓄水池近400座，最大坝高达125m。中国的沥青混凝土作为土石坝防渗体始于20世纪70年代，已建成50余座。香港特别行政区的高岛东坝和西坝均为沥青混凝土心墙堆石坝，坝高都达到100m量级。天荒坪抽水蓄能电站上水库，土石坝高72m，沥青混凝土面板连同库底防渗，总面积达28万m^2，于1997年建成蓄水。三峡茅坪溪副坝，高104m，用沥青混凝土心墙防渗。

类型　按沥青防渗体的位置，可分为沥青混凝土防渗面板和沥青混凝土心墙两种形式。沥青混凝土心墙按其施工方法不同，有碾压式和浇筑式两类。碾压式施工运用多，有全套专用施工机械，质量好、速度快。浇筑式的沥青含量较高，适应变形能力强，施工简便，不需众多机具，能在自重下压密，较适用于中低坝的防渗心墙。

沥青混凝土防渗面板土石坝见图1。沥青混凝土防渗面板有复式和筒式两种断面，见图2。复式断面由封闭层、防渗面层、排水层、防渗底层、整平胶结层等组成。封闭层用于封闭防渗层的表面缺陷，提高面板的防渗性，延缓沥青混凝土老化等。防渗面层是面板的主要防渗层，一般厚8～10cm，分两层或三层铺压，层间喷乳化沥青或稀释沥青结合层。排水层汇集防渗面层渗水，将其引入排水管或排水廊道，排出坝外。防渗底层用以隔断排水层的渗水，一般厚5～10cm，一层或两层碾压。整平胶结层可使面板与垫层良好结合。筒式断面只有封闭层、防渗层与整平胶结层，结构和施工都较方便。土石坝防渗面板大多采用筒式断面。

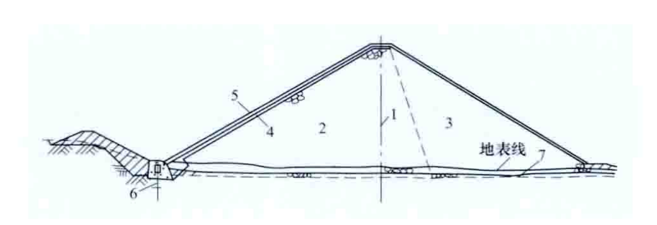


图1　沥青混凝土防渗面板土石坝示意图

1—坝轴线；2—碾压主堆石区；3—碾压次堆石区；4—过渡区；5—沥青混凝土斜墙；6—灌浆帷幕；7—排水沟

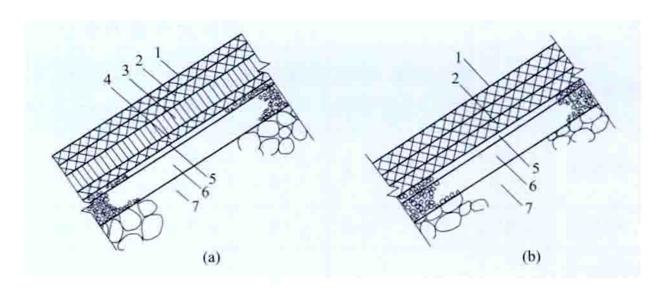


图2　沥青混凝土防渗面板断面形式

(a) 复式断面；(b) 筒式断面

1—封闭层；2—防渗面层；3—排水层；4—防渗底层；5—整平胶结层；6—垫层；7—填筑体

沥青混凝土心墙土石坝见图3。碾压式沥青混凝土心墙有垂直的、倾斜的和上部倾斜下部垂直的3种布置形式。垂直心墙布置在坝轴线上游附近，倾斜心墙的坡度一般为1∶0.2～1∶0.4（垂直∶水平）。上部倾斜下部垂直的心墙折坡点选在坝高2/3～3/4处。沥青混凝土心墙底部厚度为坝高的1/130～1/70，心墙顶部厚度不小于40cm。心墙两侧与坝壳之间应设置厚1.5～3.0m的碎石或砂砾石过渡层，过渡层最大粒径不超过80mm，小于5mm粒径的含量为25%～40%。沥青混凝土心墙与基岩、混凝土防渗墙、岸坡的连接处应设置水泥混凝土基座，连接处的心墙厚度逐渐扩大并保证止水不发生破坏。

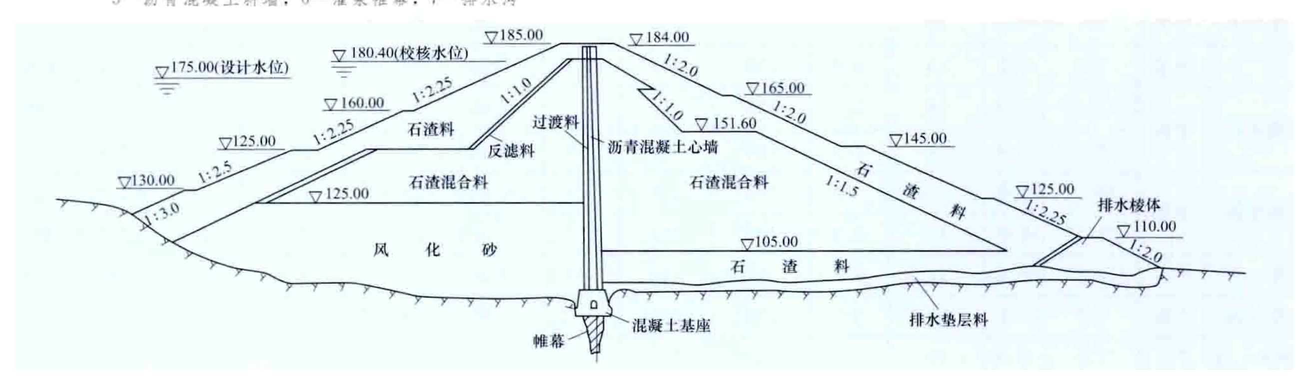


图3　沥青混凝土心墙土石坝断面示意图

沥青混凝土　沥青混凝土防渗体所用的水工沥青多为石油沥青。一般可选用道路石油沥青60甲或100甲。在技术指标不能满足设计要求时，可用两种沥青掺配，或加入掺料以改善其性能。粗骨料以碱性岩石轧制的碎石为宜，细骨料可选用天然砂或人工砂，轧石筛余的石屑也可利用。填料可采用各种矿粉、水泥、粉煤灰等粉状矿质材料。沥青混凝土的配合比应通过室内试验和现场摊铺试验进行选择，对防渗层要求孔隙率为2%～4%，渗透系数不大于1×10^{-7}cm/s，水稳定系数不小于0.85，并满足强度和柔性要求。对沥青混凝土面板还有斜坡流淌和低温不开裂的要求。碾压式面板和心墙的沥青含量分别为7.5%～9.0%和6.0%～7.5%。浇筑式心墙的沥青含量为10%～16%。

沥青混凝土的制备、运输、摊铺、碾压都是热作业，需要专用设备，对环境温度有严格要求，一般正常施工的气象条件为日平均气温在5℃以上，日降雨量小于5mm。

liqing hunningtu shigong

沥青混凝土施工 (asphalt concrete construction)

以加热的骨料、填料和沥青按设计配合比所拌和成的混凝土经碾压密实或浇筑形成结构物的施工技术。具有不透水性、伸缩性、可塑性和稳定性等优点，对地基变形有较好的适应能力。用于水利水电工程中的沥青混凝土主要作为水工建筑物防渗材料。

材料特性 沥青混凝土以沥青作胶凝材料，对原材料有特殊的要求。宜选用含蜡量较少的石油沥青和碱性骨料（如石灰岩和白云岩等），采用酸性骨料时要进行专门的试验论证后方可使用。作为防渗混凝土的沥青一般采用70号或90号水工沥青、道路沥青，骨料粒径要求不大于19mm，填料一般采用粒径小于0.075mm的碱性岩石加工的石粉。配合比随工程的应用条件，原材料种类、性能，施工条件等略有不同，沥青含量（占混合料总重的百分比）一般为6%～8.5%，填料用量（占骨料和填料总重的百分比）一般为10%～16%。

施工方法 根据沥青混凝土施工操作方法的不同，可分为碾压式和浇筑式。

碾压式 碾压式沥青混凝土多用于土石坝防渗面板和防渗心墙、抽水蓄能电站上水库的库盆和渠道防渗护面。沥青混凝土施工包括骨料干燥加热、沥青熔化储存保温、热沥青混合物拌和、运输、摊铺、碾压等工序。沥青混凝土的配合比对混凝土质量至关重要，一般通过现场试验确定最佳配合比，并按此配合比将沥青、骨料等混合物在拌和楼内高温拌和，一般先拌和骨料和填料15～25s，加入沥青后再拌和45s左右。沥青混凝土出机口温度一般为160～180℃，拌制好的沥青混凝土用汽车或保温翻斗车从拌和楼运至施工现场，卸入摊铺机中，若遇不良天气，拌和、储存、运输过程采用全封闭方式。

对斜向的防渗面板沥青混凝土，摊铺应根据结构分层，分条带、自低处向高处进行。完成摊铺后，先采用摊铺机自带的小振动碾或振动器对沥青混凝土作初步压实，再用3～6t振动碾二次碾压，初碾温度控制为120～150℃，终碾温度控制为80～120℃。

对水平填筑的心墙沥青混凝土，采用专用摊铺机或人工摊铺，然后压实。碾压设备大多选用自重小于1.5t的振动碾，一般先无振碾压1遍，再振动碾压4～8遍，最后无振碾压2遍。初碾温度控制不低于130℃，终碾温度不低于110℃。

沥青混凝土施工对拌合物的温度有较严的要求，施工受气候的影响较大，在低温季节和雨季施工应采取必要的措施。

浇筑式 浇筑式沥青混凝土主要用于寒冷地区的土石坝防渗心墙和某些混凝土坝上游垂直表面的防渗面板，多为中小型工程。沥青混凝土的原材料、制备、运输等与碾压式沥青混凝土施工工艺基本相同。不同点是：浇筑式沥青混凝土的沥青一般采用抗流变性优良及感温系数不高的沥青，而且含量较高，采用溜槽、吊罐等入仓，不用碾压工具，依靠自身重量压密。沥青浇筑时的两侧支护一般采用混凝土预制块，也有的采用钢模板。

质量控制 包括原材料、混合料制备以及现场施工质量的检验与控制。原材料的质量控制内容主要有：①沥青厂家的出厂合格证验收，在入库前和使用前检验沥青的针入度、软化点、延度、含蜡量等品质指标；②粗细骨料及填料的密度、吸水率、坚固性、含泥量、级配、亲水系数等；③改性剂的检验。沥青混合料制备的控制内容主要包括工艺控制、温度控制和配合比控制等，混合料应进行沥青用量、矿料级配、孔隙率、马歇尔稳定度、流值以及温度检验，拌和好的混合料低于140℃或超过48h均应作为废料处理。现场施工质量的控制主要包括：①碾压温度监测；②采用无损检测的方法对沥青混凝土进行渗透系数、孔隙率等指标的检测；③外观检查；④钻孔取芯进行沥青混凝土的物理力学性能试验。

发展概况 最早的沥青混凝土面板堆石坝是1934年德国的阿梅克（Amecke）坝，坝高12m。1937年阿尔及利亚修建格立勃（Ghrib）坝，坝高65m，经1954年国际鉴定运行18年后良好，各国才予重视，所以大部分水工沥青混凝土建筑物都是在20世纪50年代以后修建的。1998年建成的浙江天荒坪抽水蓄能电站水库库盆沥青混凝土防渗护面面积达到28.6万m^2，共使用了约8500t沥青和1.3万t灰岩骨料；2003年建成的中国茅坪溪沥青心墙土石坝最大坝高104m，沥青心墙防渗面积4.63万m^2，方量约5万m^3，是中国首个采用全过程机械化施工的工程；2005年建成的冶勒沥青心墙堆石坝最大坝高124.5m，属高寒多雨地区，通过大型碾压沥青混凝土心墙联合摊铺机等技术应用，在日平均气温低于5℃、最低气温为－5℃的环境条件下，沥青心墙连续施工且每日连续铺筑2～3层，增加了年内有效施工时间，加快了进度。

liangongba

连拱坝 (multiple arch dam)

具有拱形面板的支墩坝。拱形面板向上游倾斜，坡度为40°～60°。拱中心角为90°～180°。连拱坝的特点有：①利用拱的作用，拱形面板基本受压，故其跨度大、截面薄，并可视地形情况采用不同的跨度；②由于支墩间跨度大，支墩的厚度也就相应加大，故支墩具有一定的侧向刚度，且支墩之间由具有一定柔性的拱形面板相连，一般可不增设支墩间的支撑；③拱形面板系超静定结构，设计中需考虑温度荷载的作用。

连拱坝坝型在支墩坝中问世较早，1917年美国修建了豪杰湖（Lake Hodges）连拱坝，坝高41.5m。中国于1954年和1956年相继在安徽省建成了佛子岭和梅山连拱坝，坝高分别为74.4m和88.2m，前者是中国设计建设的第一座高坝，后者是当时世界上最高的连拱坝，见图1。1968年在



图1 梅山连拱坝

加拿大建成的丹尼尔·约翰逊（Daniel Johnson）连拱坝，坝高214m，是世界上连拱坝（也是支墩坝）中最高的，最大跨度为162m，见图2。由于连拱坝结构和施工复杂，此坝型已很少采用。

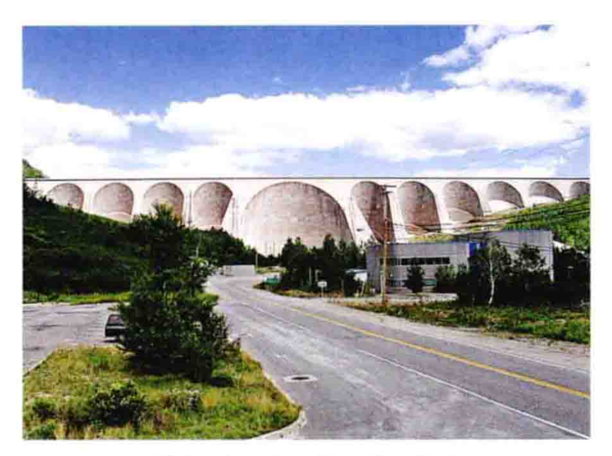


图2　丹尼尔·约翰逊连拱坝

Lianhua Shuidianzhan

莲花水电站　（Lianhua Hydropower Station）　位于中国黑龙江省海林市与林口县交界处，是牡丹江下游梯级开发的第一座大型水电站，莲花水库为牡丹江（荒沟）抽水蓄能电站的下水库。工程开发任务以发电为主，并兼有防洪、灌溉等综合利用效益，见图1。电站装机容量550MW，多年平均年发电量7.97亿kW·h。以3回出线（其中1回预留场地）220kV一级电压接入黑龙江省主网。



图1　莲花水电站

水文和水库特征　坝址以上流域面积30 200km²，占总流域面积的80%，多年平均流量221m³/s。水库总库容41.8亿m³，为年调节水库。水库正常蓄水位218.00m，死水位203.00m，50年一遇设计洪水位220.58m，可能最大洪水校核水位为225.41m。坝址区处严寒地区，多年平均气温3.2℃，极端最低气温－45.2℃，结冰期为5个月。

地形与地质条件　坝址位于河弯段的不对称U形谷，右岸陡峻，左岸为漫滩和Ⅱ、Ⅲ级阶地。枢纽区主要岩性为下元古界混合花岗岩及闪长岩、正长斑岩、花岗斑岩岩脉。主要断层F_1横贯左岸二坝上下游，破碎带宽108m。地震基本烈度为Ⅵ度，大坝按7度设防。

枢纽布置　枢纽工程由大坝、泄水建筑物、引水发电系统等组成，见图2。

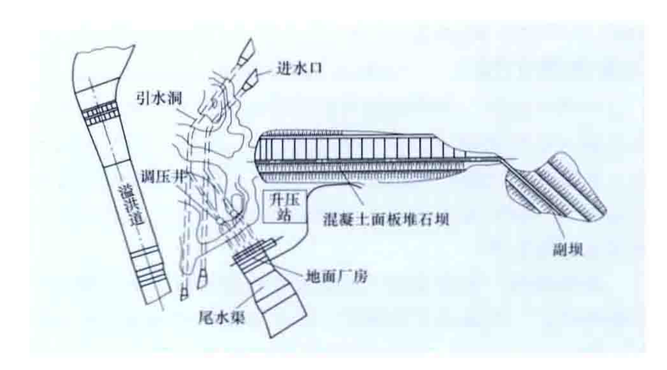


图2　莲花水电站枢纽布置平面图

大坝　由主坝和副坝组成。

主坝位于主河床，坝型为混凝土面板堆石坝，最大坝高71.8m，坝顶高程225.8m，坝顶长度902m，坝顶宽8.0m，大坝上、下游坝坡坡度均为1∶1.4，坝体填筑量382万m³。混凝土面板厚0.3～0.5m，面板总面积75 400m²。

副坝位于左岸垭口处，为黏土心墙砂砾石坝，最大坝高47.2m，坝顶长332m、宽8.0m，上、下游坝坡坡度分别为1∶2.0、1∶2.25。坝体堆石填筑约47万m³，心墙黏土填筑8.7万m³。

泄水建筑物　溢洪道位于右岸的山体垭口处，溢流前沿总长度130m。溢洪道由溢流堰、泄槽和挑流鼻坎组成，全长990m。最大泄量18 570m³/s，共7孔，设有16m×13.4m弧形工作门和平板检修门。

引水发电系统　位于右岸，两条引水隧洞采用岸塔式进水口，隧洞均为圆形钢筋混凝土衬砌，内径13.7m，长分别为620.54m和493.98m。引水隧洞末端均设有一座内径为16.5m的阻抗式调压井，为复式双圆弧形，高94.02m。4条压力管道从井后接出，直径为8.4m，每条长140m，采用钢板衬砌。

厂房为岸边地面厂房。主厂房尺寸为162.5m×29m×55.98m（长×宽×高）。安装4台137.5MW的水轮发电机组，4台主变压器布置在厂后平台。开关站布置在厂房左侧。另外，为满足下游供水要求，对原已有的1号引水隧洞与2号导流洞进行改造，改造工程的装机容量为9.6MW，引用流量为23.1m³/s。

工程施工　施工导流采用导流隧洞或土石围堰的全年导流方式。总工程量为：土石方开挖664.73万m³，混凝土浇筑54.48万m³，土石方填筑670.86万m³，帷幕和固结灌浆7.15万m，钢筋1.99万t，金属结构安装0.41万t。工程于1992年11月开工，1994年10月截流，1996年12月首台机组发电，1998年9月全部4台机组投产发电。

设计单位　水利部能源部东北勘测设计院（现中水东北勘测设计研究有限责任公司）。

建设单位　黑龙江省水电建设管理局。

Liao He shuixi shuineng ziyuan

辽河水系水能资源　（hydropower resources of Liaohe River System）　据《中华人民共和国水力资源复查成果（2003年）》统计，辽河水系水能资源理论蕴藏量102.88亿kW·h/a，仅占中国水能资源的0.17%，其中技术可开发装机容量407.1MW，多年平均年发电量11.34亿

kW·h，仅占中国水能资源的0.05%。技术可开发的水电站都为小型，主要集中在支流太子河和浑河，分布见表。

辽河水系水能资源分布表

河流名称	流域面积 (km^2)	河道长度 (km)	天然落差 (m)	理论蕴藏量 (亿kW·h/a)	技术可开发量		
					电站数量 (座)	装机容量 (MW)	年发电量 (亿kW·h)
辽河水系合计	221 097	1345	611.6	102.88	114	407.1	11.34
干流：西辽河	135 193	829	527.6	22.59	19	29.1	1.05
支流：西拉木伦河	18 867	380	1134.5	12.35	15	38.0	1.06
东辽河	10 364	359.6	285	2.69	3	10.7	0.23
浑　河	11 481	391	750	13.93	29	179.0	4.86
太子河	13 883	347	820	22.60	23	117.3	3.40
其他支流				28.72	25	33.0	0.74

辽河干流发源于河北省七老图山脉的光头山，流经河北、内蒙古、吉林、辽宁4省（区），于辽宁省盘锦市注入渤海。干流全长1345km，流域面积221 097km^2，河口处多年平均流量378m^3/s。干流源头称老哈河，由西南向东北流，支流西拉木伦河汇入后称西辽河，纳入东辽河后始称辽河。水能资源主要集中在西辽河及支流西拉木伦河、辽河中下游地区的浑河和太子河上。辽河水系的主要开发任务是防洪和供水，径流量较少，水能资源开发利用条件不理想。技术可开发的水电站达114座，总装机容量仅407.12MW，仅5座电站的装机容量大于10MW，没有超过50MW的水电站。

liexi

裂隙 （fissure）　岩体中的各种破裂面或裂纹。裂隙发育与成岩作用、构造运动方向及所处具体构造部位等存在成因联系，裂隙分布呈现一定规律性。成因相同、同期形成而又相互平行的一组裂隙面称为节理。

Liujiaxia Shuidianzhan

刘家峡水电站 （Liujiaxia Hydropower Station）　位于黄河上游干流，甘肃省永靖县境内，距兰州市100km，是中华人民共和国成立后的第一座容量超过百万千瓦的大型水电站，见图1。电站开发任务以发电为主，兼有防洪、灌溉、供水、防凌等综合利用效益。装机容量1225MW，多年平均年发电量57亿kW·h，以330kV和220kV电压接入西北电力系统，供电给陕西、甘肃、青海、宁夏。1989～2002年分别对机组进行增容改造，改造后电站总容量达1350MW。



图1　刘家峡水电站

水文和水库特性　坝址以上流域面积181 766km^2，多年平均年径流量273亿m^3，多年平均流量867m^3/s。水库校核洪水位1738.00m，相应库容64亿m^3；设计洪水位和正常蓄水位1735.00m，相应库容57亿m^3；死水位1694.00m，死库容15.5亿m^3，为季调节水库。主、副坝洪水设计标准为：设计洪水1000年一遇，校核洪水10 000年一遇。在不计龙羊峡水库调蓄时，设计洪水流量8860m^3/s，相应库水位1735.00m；校核洪水流量10 600m^3/s，相应库水位1738.00m。年平均输沙量8940万t，实测最大含沙量310kg/m^3。

枢纽布置　枢纽工程由大坝、泄水建筑物、厂房等组成，见图2。

大坝　主坝为混凝土整体式重力坝，最大坝高147m，坝顶高程1739.00m，坝顶长204m。其左为左岸混凝土重力副坝，长51m；其右为右岸混凝土重力副坝，长300m；再右为右岸溢洪道，长48m。右接连接副坝和右岸黄土副坝，分别长47m和143.25m。黄土副坝地质沟回填部分轴线长205m。

泄水建筑物　右岸溢洪道，全长872.8m，首部设有胸墙式溢洪孔3孔，孔口宽10m、高8.5m，堰顶高程1715.00m，设计最大泄流量3785m^3/s。左岸设2孔泄水道，渠道长241m，孔口宽3m、高8m，进口底坎高程1665.00m，设计最大泄流量1488m^3/s。泄洪隧洞1条，由位于厂房和右岸溢洪道间的导流洞改建，长529m，孔口宽8m、高9.5m；洞身宽8m、高12.9m，进口底坎高程1675.00m，设计最大泄流量2140m^3/s，洞内最大流速达45m/s。右岸排沙洞，洞身长615.5m，孔口宽2m、高2.8m，进口底坎高程1665.00m，设计最大泄流量105m^3/s。

厂房 混合式厂房内装有5台机组，3台布置在坝后，2台布置在窑洞内。窑洞部分和坝后部分之间设安装场连接。5台机组均为竖轴混流式水轮发电机组，5台机组最大引用流量1376m³/s。设计单机容量：1、2、4号机组为225MW；3号机组为250MW；5号机组为300MW。额定转速均为125r/min。水轮机转轮直径均为5.5m。发电机：1～4号为悬式空冷型，额定电压15.75kV，额定功率因数0.875。5号机组为半伞式双水内冷型，额定电压18kV。发电机电压侧采用单元接线，220kV侧采用双连四角形接线，330kV侧采用三角形接线。330kV和220kV两级电压间设有1台360MV·A自耦联络变压器。1、2号机组的主变压器布置在主厂房下游窑洞内；3～5号机组的主变压器和自耦变压器均布置在坝后厂房上游厂坝间。

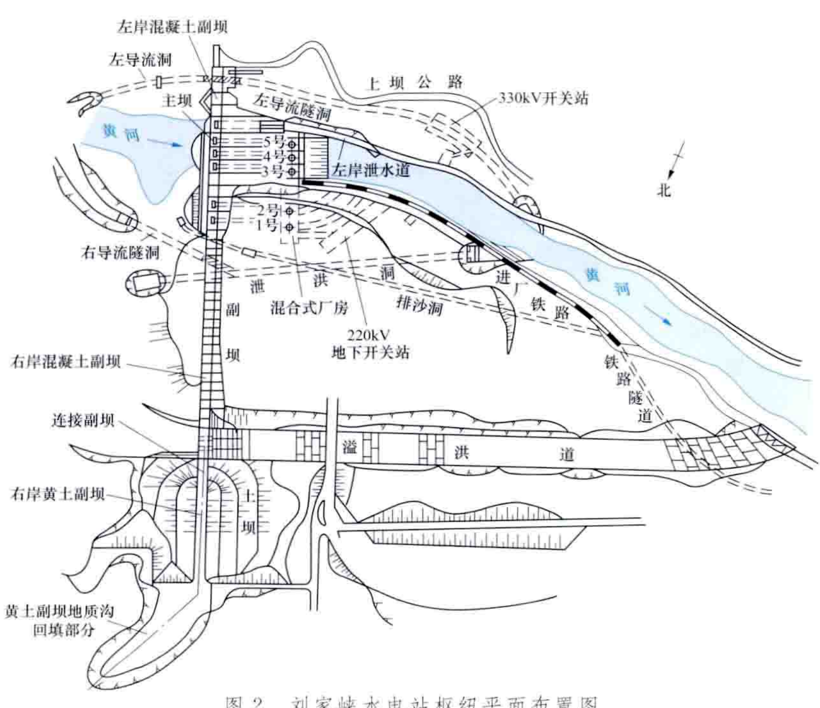


图2 刘家峡水电站枢纽平面布置图

机组受当时制造技术限制而出力不足，1980年电站整体竣工验收时核定总装机容量为1160MW。2002年机组增容改造后，1、3号机组出力为260MW，2、4号机组出力为255MW，5号机组出力为320MW。2007年电站3～5号机组接入新建的330kV GIS开关站，开关站采用双母线接线，4回出线；2011年1、2号机组接入新建的220kV GIS开关站，开关站采用外桥接线，2回出线，解决了电站送出受限问题，消除了220kV和330kV系统间的电磁环网。

综合利用 到2009年底累计发电1796亿kW·h，担负西北电力系统的调峰、调频和事故备用任务。可使兰州市100年一遇洪水洪峰流量由8500m³/s削减为6500m³/s。经水库调节使下游梯级水电站提高保证出力50%。

工程施工 工程于1958年开工，1961年停建缓建，1964年复工，1969年3月29日首台机组试运行，同年4月1日正式投产发电，1974年竣工。1989～2002年分别对5台机组进行了增容改造。

主要工程量：土石方开挖847万m³，混凝土浇筑182万m³。

设计单位 北京勘测设计研究院（现中国水电顾问集团北京勘测设计研究院）。

liubianxue

流变学

（rheology） 属于固体力学和流体力学之间的交叉学科，研究物体（包括固体、液体和气体）在载荷、位移和环境条件（温度、湿度等）作用下应力、应变和位移随时间的变化规律，在固体力学中也称蠕变力学（creep mechanics）。物体的流变性能表现在蠕变（也称徐变）和黏性流动、弹性后效和应力松弛等方面，它们的共同特点是均为时间的函数。物体在恒定应力作用下，变形随时间的延长而增大的现象称为蠕变。物体在蠕变一段时间后卸载，其部分应变永久不恢复的现象称为黏性流动。对物体加卸载后，其应变经过一段时间后才增加（或减少）到某一数值的现象称为弹性后效。物体在恒定应变作用下，应力随时间的延长而减小至某个有限值的现象称为应力松弛。在不同的物理条件（温度、载荷、位移、湿度、辐射、电磁场等）下，以应力、应变和时间变量定量描述材料状态的方程，叫做流变状态方程或本构方程。

材料的流变特性可以用力学模型，如用3种流变元件的串、并联组成的3类基本力学模型和在此基础上建立的复杂力学模型来模拟。这3种流变元件分别是胡克元件（弹簧）、牛顿元件（阻尼器）和塑性元件（摩擦元件）。

（1）胡克元件（弹簧）：与线弹性体对应，用一物理常量（弹性模量）表示弹性体和应变之间的线性关系。

（2）牛顿元件（阻尼器）：与牛顿黏性流体对应，用一物理常量（黏度）表示流体应力与应变速率之间的线性关系。

（3）塑性元件（摩擦元件）：与理想塑性体对应，当载荷作用产生的应力达到一物理常量（屈服极限）时，塑性体开始产生塑性变形，且应力不增加塑性变形仍然增长。

3类基本力学模型分别是黏弹性流体模型、黏弹性固体模型和理想黏塑性体。

（1）黏弹性流体模型：也称麦克斯韦（Maxwell）流体模型（1867年）。该模型由胡克元件和牛顿元件串联构成，可以反映应力松弛等现象，但描述蠕变特性较差。

（2）黏弹性固体模型：也称开尔文（Kelvin）固体模型（1875年）。该模型由胡克元件和牛顿元件并联构成，可以反映蠕变等现象，但描述应力松弛特性较差。

（3）理想黏塑性体：也称宾汉体（Bingham）模型（1916年）。该模型由塑性元件和牛顿元件并联构成，当应力小于塑性极限时物体为刚性不变形，当应力达到塑性极限时物体为黏性牛顿流体。

材料的流变特性也可用经验方程法描述，它是根据物体的流变试验结果，通过数理统计方法拟合出流变状态方程（或本构方程）的经验表达式。

对于变载荷历史条件下的流变，工程中常应用玻尔兹曼叠加原理。该原理指出，对于变载荷历史，每个载荷对材料应变的贡献是独立的，材料的总应变是各个载荷产生应变的线性之和；对于应力松弛过程，每个变形对材料应力的贡献也是独立的，材料的总应力等于各个变形产生应力的线性之和。

对于温度敏感型材料（如高分子材料）的流变，工程中常应用时温等效原理（time temperature superposition，TTS）。该原理指出，线黏弹性材料在不同温度下具有形状相同的松弛模量（或蠕变柔量）曲线，当温度变化时，这些曲线将左右平行移动，其平移量称为平移因子。M. L. 威廉姆斯（M. L. Williams），R. F. 兰德尔（R. F. Landel）和 J. D. 费雷（J. D. Ferry）于1955年首先提出了一个平移因子与温度的经验关系式，即WLF方程。

流变学在水电工程中有许多重要应用，随着高坝工程的日益增多，岩石、土、混凝土、沥青混凝土等材料的流变特性得到了越来越多的关注。此外，流变学在地球科学、冶金、高分子化学和生物学等方面中也有许多重要应用。

参考书目

沃德 I M. 固体高聚物的力学性能. 北京：科学出版社，1980.

liuliang ceyan

流量测验 (discharge measurement)　对江河渠道水流量的实地测量。流量是单位时间内通过江河某一横断面的水量，以 m^3/s 计。江河的流量随时间而变化，通常不直接用实测流量值来反映流量变化过程，而是通过有限的实测流量与相应水位建立水位流量关系，用连续的水位观测资料推算流量过程及其特征值。建立水位流量关系的实测流量应包括高中低水位情况。

流量测验方法按其原理分为流速面积法、建筑物测流法、稀释法3类。中国及世界上大部分国家流量测验以流速面积法为主。

流速面积法　通过实测断面上的流速和过水面积推求流量的方法，分为流速仪法、浮标法、比降法和超声波法等。

（1）流速仪法。最基本的流量测验方法，测量的成果可作为率定或校核其他测流方法的标准。流速仪法测流是在测流断面上设若干条测速垂线，在每条垂线上布设若干测点，用流速仪测出各测点的水流速度，用测深仪或测深杆测出各条垂线的水深，用测距仪测得相临两条垂线之间的距离，分别算出两垂线之间的部分面积和部分平均流速，推算出各个部分的流量，再求和得到全断面的流量值。运载流速仪的设备在平原宽河道多用测船，山区窄河道多用水文缆道。当有足够的垂线且每条垂线有较多的测点时此法测验成果精度较高。

（2）浮标法。通过测定水面或水中的天然或人工投掷的浮标物随水流运动的速度以推求流量的方法。通常垂直于流向设置上、中、下3个断面，从上游投掷浮标，测定其流经上下断面的历时和经过中断面的位置，以上下断面间的距离除以漂流历时，求出浮标流速，按其在中断面的位置绘出流速沿断面分布曲线，并求得各部分的浮标流速，乘以浮标系数换算成部分平均流速，再用实测的断面资料计算流量。浮标流经各断面的位置用普通测量仪器观测。浮标系数根据试验或比测确定，一般为0.8～0.9。大洪水时期难以用流速仪测流时常用水面浮标测流。利用电波流速仪测量水面流速的方法可以代替浮标，使高洪流量测验更加便捷，也使天然河道水文站流量在线监测更加方便。

（3）比降法。通过实测或调查河段的水面比降和过水断面面积，用水力学公式推求流量的方法。通常使用水力学中的曼宁（Manning）公式

$$v=R^{2/3}S^{1/2}/n$$

$$Q=Av$$

式中 v 为流速，m/s；R 为水力半径（常用平均水深代替），m；S 为水面比降；n 为糙率；Q 为流量，m^3/s；A 为断面面积，m^2。此法精度较差。

（4）超声波法。常用的有时差法和ADCP（acoustic doppler current profiler）测流法。时差法是在河流两岸设置发射和接收超声波的装置，其位置的连线斜向水流，利用超声波斜向上游和斜向下游传播的时间差与流速的函数关系测量流速。再根据已有断面资料推求流量。ADCP即声学多普勒流速剖面仪，是根据声波遇到水流中颗粒物后的回波的频率变化量，来确定水流速度的新型流量测验仪器。它可以分时段接收回波来计算不同水深点的流速，同时根据河底回波计算水深。ADCP流量测验又分为走航式和定点式。走航式ADCP主要由4个（或3个）声波换能器、计算机和测流软件、电源、通信电台、测船等组成，根据需要可外接全球定位系统（GPS）、罗盘仪、测深仪。声波换能器安装在测船上，计算机通过电台控制换能器工作，使测船从一岸驶向另一岸，ADCP根据设定的参数，在断面上分若干条垂线，在每条垂线上分若干个测点，分别测出各测点的流速和各垂线的水深。根据设置的岸边系数，自动计算出各部分流量和全断面流量值。与传统的流速仪法相似，可以布设更多的垂线和更多的测点，同时缩短测流历时，使测验精度和工作效率更高。定点式ADCP流量测验，分垂向代表线法和横向流量测验两种方式。垂向代表线法是用ADCP测量1条或固定几条垂线的流速纵向分布；横向流量测验是测量断面某一固定高程流速的水平横向分布。根据垂线平均流速和水平平均流速与断面平均流速的关系和已有的断面资料来计算全断面流量值。

建筑物测流法，通过测量量水建筑物或河渠中已建的水工建筑物的有关水力因素，根据事先率定出的流量系数，利用水力学中的出流公式计算流量。通过跨河建筑物上游水位、上下游水位差、闸门开度与泄流量的函数关系，用水力学公式推算流量。测流建筑物的形式有薄壁堰、三角堰、宽顶堰、巴歇尔量水槽等，其流量系数在实验室用模型率定或在现场率定。此法工作方便，精度较好，但造价较高，一般用于中小河流及人工渠道。利用已建的水工建筑物如闸、坝、溢洪道、水电站等测流也是经济实用的方法，其流量系数一般要在现场实测率定，也可通过模型试验率定。

稀释法　在测验河段的上游注入一定的已知浓度的化学指示剂，经水流充分稀释混合后，在下游取样断面测定稀释后的化学指示剂浓度来推求流量的方法。水流的紊动作用能够使化学指示剂在水中稀释扩散并充分混合，其稀释的程度

与水流流量成正比。化学指示剂主要有食盐、重铬酸钠、同位素、荧光染料等。稀释法不需实测流速及断面面积，野外工作量较小，适用于水流紊动强的较小河流。

参考书目

谢悦波．水信息技术．北京：中国水利水电出版社，2009.

liuti lixue

流体力学

（fluid mechanics） 研究各种力的作用下流体运动规律的学科，是力学的一个分支。

研究内容 分为流体静力学、流体运动学、流体动力学3部分：①流体静力学。研究静止流体的平衡及压力分布。②流体运动学。研究流体运动的几何性质，用拉格朗日法或欧拉法描述流体质点的位置、速度、加速度或流动空间的速度分布。③流体动力学。研究流体在力的作用下的运动规律及其与边界的相互作用，主要包括流体的应力与变形率的关系，运动的基本方程组等。

按研究对象划分，流体力学的主要分支为气体动力学（其中主要是空气动力学）、液体动力学和水力学。

研究方法 分为理论分析、实验研究及数值计算3个方面。对于复杂的流体力学问题，需要用几种方法结合起来进行研究。

（1）理论分析。首先是建立力学模型，如早期学者为简化方程，假定流体为无黏性和不压缩的理想流体模型，现代则有考虑流体黏性的牛顿流体模型以及考虑流体压缩的模型等。其次是建立数学模型，即依据物理规律和针对流动特点用数学方程表达力学模型。最后是求解方程并对结果进行分析。

（2）实验研究。通过对流体运动的量测直接寻求流体参数之间的定量关系，总结出实用的经验公式。实验研究分为现场观测和实验室模拟两种，现场观测能取得流动的天然真实资料，但工作量及费用浩大，且难以在控制条件下作系统研究；实验室模拟可以有控制地系统地进行，但存在缩尺影响，实际常是两者结合进行。

（3）数值计算。流体运动的基本方程组多是非线性偏微分方程，难于用解析法求解。随着电子计算机的发展，流体力学日益广泛采用数值计算方法，即将基本微分方程离散为有限差分或有限元形式，以各种数值计算方法，应用计算机求近似解。计算结果通常需要和实验结果比较、验证。

简史及发展 流体力学的知识最早来源于对自然现象的观察和生产劳动经验的总结，同时随着生产和技术的进步而不断发展。有记载的定量规律，始于希腊阿基米德（Archimedes，公元前287—公元前212年）的浮力定理，它为流体静力学奠定了基础。15世纪意大利达芬奇（Leonardo da Vinci，1452—1519）的著作中谈到水波、管流、水力机械、鸟的飞翔等原理。17世纪力学奠基人I. 牛顿（I. Newton，1643—1727）对流体的内摩擦力和流体的阻力都提出了重要的定律，奠定了流体动力学的基础。18世纪D. 伯努利（D. Bernoulli，1700—1782）提出联系流速、压力和位置的能量方程，I. 欧拉（I. Euler，1654—1705）建立了理想流体运动的微分方程，C. L. M. H. 纳维（C. L. M. H. Navier，1785—1836）和G. G. 斯托克斯（G. G. Stokes，1819—1903）分别建立了黏性流体运动方程，流体动力学的理论有了长足的发展。1904年L. 普朗特（L. Prandtl，1875—1953）创立了边界层理论，边界层内黏性流动的方程得到简化而较易求解，边界层外的流动可以忽略黏性，使理论与实用两种途径得到统一，逐渐形成现代流体力学的格局。19世纪末O. 雷诺（O. Reynolds，1842—1912）提出实际流体存在层流和紊流（湍流）两种流动状态，并建立了研究紊流的平均化方法，使流动机理的研究引向深化。

现代量测技术（如热线、激光、同位素、高速摄影、微机控制、粒子示踪、摄像、图像处理、遥感技术以及各种电测仪器）的进步，使显示和量测复杂流动成为可能；数值计算方法的发展和广泛应用，能够求解许多过去难以解决的问题；这两种手段的发展，体现了现代流体力学的特点。同时，现代生产建设对流体力学不断提出了新要求，如：飞机和航天飞行器的出现，推动了高速的气体流动和稀薄气体流动的研究；大型水利水电工程建设和海洋的开发使古老的水力学得到新的发展。流体力学有很多新的分支，除计算流体力学和多相流体力学有很大发展外，还和其他学科互相交叉渗透形成许多交叉或边缘学科，如物理化学流体力学、等离子体流体力学、电磁流体力学、生物流体力学、地球流体力学及环境流体力学等。

参考书目

普朗特L，等．流体力学概论．郭永怀，陆士嘉，译．北京：科学出版社，1981.

易家训．流体力学．章克本，张涤明，陈启强，等译．北京：高等教育出版社，1983.

Longtan Shuidianzhan

龙滩水电站

（Longtan Hydropower Station） 位于中国红水河上游、广西壮族自治区天峨县境内，距天峨县县城15km。电站开发任务以发电为主，兼有防洪、航运等综合利用效益，见图1。电站拟分两期开发，初期总装机容量4900MW，多年平均年发电量156.7亿kW·h；远景总装机容量达6300MW，多年平均年发电量187.1亿kW·h。



图1 龙滩水电站

水文和水库特性 坝址控制流域面积98 500km²，多年平均流量1610m³/s，多年平均年径流量510亿m³。500年一遇设计洪水流量28 400m³/s，10 000年一遇校核洪水流量36 500m³/s。初期正常蓄水位375.00m时，总库容162.1

亿 m³，调节库容 111.5 亿 m³，为年调节水库。远景正常蓄水位 400.00m 时，总库容 272.7 亿 m³，调节库容 205.3 亿 m³，可进行多年调节。

坝址地形和地质 坝址附近无区域性活动断层，坝区地震基本烈度为Ⅶ度。坝址为开阔的 V 形河谷，宽高比约为 3.5。坝区基岩以砂岩和泥板岩为主。岩石强度较高，岩层产状有利于坝基防渗和边坡稳定。坝区地质构造以高陡倾角断裂为主，但多数规模小且与河床斜交。左岸地质条件明显优于右岸，适宜布置地下厂房系统。

枢纽布置 枢纽工程由大坝、泄水建筑物、引水发电系统及通航建筑物等组成，见图 2。

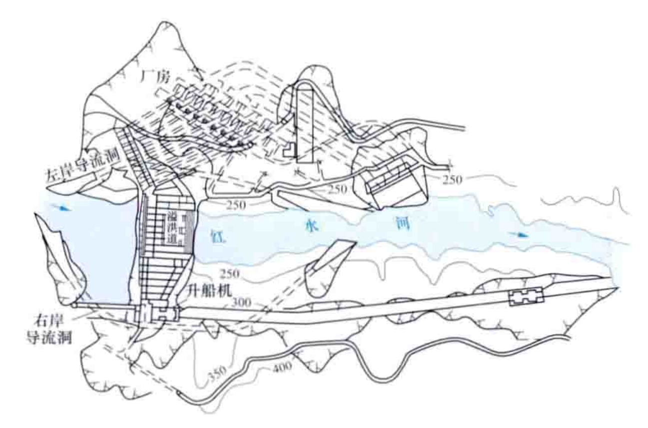


图 2 龙滩水电站枢纽平面布置图

大坝 碾压混凝土重力坝。初期建设时，最大坝高 192m，坝顶长 761.26m；远景大坝加高后，最大坝高 216.5m，坝顶长 849.44m。

泄水建筑物 由 7 个表孔和 2 个底孔组成。表孔承担泄洪任务，单孔尺寸为 15.0m×20.0m（宽×高），堰顶高程初期 355.0m，后期提高至 380.00m；初期设计水位泄量 19 919m³/s，初期最大总泄量为 27 692m³/s。泄洪消能形式为高低坎大差动式挑流消能，高、低挑坎高差 18.00m。底孔对称布置在表孔两侧，不承担泄洪任务，用于水库放空和后期导流。底孔进口底板高程 290.00m，控制断面尺寸为 5.0m×8.0m。

引水发电系统 位于左岸，引水洞采用单机单洞式，内径 10m，长度 256.69～354.90m。厂房跨度 28.5m，全长 388.5m，高 70.8m。厂房内初期安装 7 台水轮发电机组（远景增加到 9 台），单机容量 700MW；水轮机转轮直径 7.906m，额定转速 107.1r/min；发电机为立轴半伞式密闭空冷型，额定电压 18kV，额定功率因数 0.9。主变压器洞布置在厂房下游侧，轴线与厂房平行，两洞间岩墙厚 43m，宽 19.50m，长 308.10m，高 21.3m。主变压器采用三相组合变压器。

长廊阻抗式尾水调压室位于主变压器洞下游侧，平行于主变压器洞。每 3 台机组共用一个调压室和一条尾水洞。调压室高 62.70～82.70m，宽 18.50～21.93m，总长 237.10m，调压室之间留 27～62m 厚岩柱。3 个调压室在高程 251m 以上互相连通。3 条尾水主洞为圆形断面，内径 21m，其进出口段根据地质情况以弯道相连，总长度分别为 352.65、466.55m 和 572.49m。

通航建筑物 两级垂直升船机，连同上、下游引航道，全长约 1800m。升船机按通过 500t 驳船设计，年通过能力可达 460 万 t。

工程施工 施工导流采用围堰一次拦断河床，左、右岸导流隧洞过流的导流方式。碾压混凝土围堰导流标准为 43 年实测水文系列的全年 10 年一遇洪水，洪峰流量为 14 700m³/s。工程于 2001 年 7 月 1 日开工建设，2003 年 11 月截流，2007 年 5 月首台机组发电，2008 年 12 月初期工程完工，通航建筑物主要土建工程已完工。

主要工程量：初期建设时，土石明挖 1707 万 m³，石方洞挖 371 万 m³，混凝土量 879 万 m³，钢筋、钢材 11.1 万 t，金属结构安装 3.80 万 t。

设计单位 中国水电顾问集团中南勘测设计研究院。

建设单位 中国大唐集团龙滩水电开发有限公司。

Longyangxia Shuidianzhan

龙羊峡水电站 (Longyangxia Hydropower Station)

位于中国黄河干流上游青海省共和、贵德县境内，距西宁市 147km。工程开发任务以发电为主，兼有防洪、灌溉、供水等综合利用，见图 1。装机容量 1280MW，多年平均年发电量 59.42 亿 kW·h。以 6 回 330kV 输电线路接入西北电网，供电给青海、甘肃、陕西、宁夏 4 省区。



图 1 龙羊峡水电站

水文和水库特性 坝址以上流域面积 131 420km²。坝址多年平均流量 650m³/s，多年平均年径流量 205 亿 m³。多年平均输沙量 2490 万 t，含沙量 1.24kg/m³。1000 年一遇设计洪水流量 7040m³/s，相应库水位 260.25m。可能最大洪水校核洪水流量 10 500m³/s，相应库水位 2607.00m，总库容 276.3 亿 m³。正常蓄水位 2600.00m，相应库容 247 亿 m³。死水位 2530.00m，调节库容 193.5 亿 m³，具有多年调节性能。

坝址地形和地质 坝址区受河西系构造影响，地震基本烈度为Ⅷ度，主要水工建筑物按 9 度设防。坝轴线下游约 300m 处，有断层横切河床，形成冲沟。两岸坝肩山体较为单薄。除右岸副坝局部坝段外，建筑物地基为坚硬的花岗闪长岩，但断裂较为发育。近坝库区右岸为半岩状黏性土为主的河湖相地层，岸坡高达 300～500m。

枢纽布置 枢纽工程由大坝、泄水建筑物及厂房等组成，见图 2。

大坝 由主坝和左右岸副坝组成，挡水前沿总长

图 2 龙羊峡水电站枢纽平面布置图

1226m。主坝为混凝土重力拱坝，坝长 396m，坝顶高程 2610.00m，最大坝高 178m，最大底宽 80m。

泄水建筑物 有表孔、中孔、深孔及底孔 4 层。右岸设 2 个表孔溢洪道，弧门孔口尺寸为 12m×17m，堰顶高程 2585.50m，最大泄流量 4493m³/s。左岸中孔泄水道弧门孔口尺寸 8m×9m，进口底坎高程 2540.00m，最大泄流量 2203m³/s。右岸深孔及底孔泄水道弧门孔口尺寸均为 5m×7m，进口底坎高程分别为 2505.00m 和 2480.00m，最大泄流量分别为 1304m³/s 和 1498m³/s。深、底孔均采用斜扭鼻坎挑流消能方式，表孔和中孔采用窄缝式挑流鼻坎挑流消能。

厂房 坝后地下混合式厂房，位于大坝下游 60～70m 处，呈一字形。用坝内压力钢管引水，钢管内径 7.5m，管壁厚 20～40mm。主厂房内设 4 台 320MW 的混流式水轮发电机组。水轮机转轮直径 6m，转速 125r/min，额定出力 325.6MW。水轮发电机为半伞式，额定电压 15.75kV，额定容量 355.6MV·A，额定功率因数 0.9。发电机侧采用发电机-变压器组单元接线。330kV 侧采用双母线单分段带旁路隔离开关的接线。4 台三相双线圈强油循环水冷变压器，每台容量 360MV·A，布置在尾水平台上。330kV 户内开关站，采用 SF_6 封闭组合电器布置在尾水平台上的副厂房内。

工程施工 采用断流围堰、右岸隧洞泄水、基坑全年施工的导流方式，按 20 年一遇洪水标准（流量 Q=4000m³/s）导流。

主要工程量：石方开挖 334 万 m³，混凝土浇筑 316.5 万 m³，钢筋、钢材及金属结构 6.8 万 t。工程于 1976 年开工，1987 年 9 月第一台机组发电，1989 年 4 台机组投运。

综合利用 由于水库的调节作用，增加下游已建的刘家峡、盐锅峡、八盘峡、青铜峡 4 个水电站的保证出力共 254.8MW 和多年平均年发电量共 5.13 亿 kW·h；可削减下泄洪峰流量 3040～4500m³/s，使刘家峡水电站的防洪校核标准由 5000 年一遇提高到可能最大洪水，使盐锅峡水电站防洪校核标准由 1000 年一遇提高到 2000 年一遇，使八盘峡水电站防洪校核标准由 300 年一遇提高到 1000 年一遇。同时也提高了下游城镇和兰新、兰青、包兰等铁路干线的防洪标准。与刘家峡水库联合调节，可以满足黄河上游河段（内蒙古河口镇以上）各省区每年工农业和城镇用水 127 亿 m³，并补给河口镇以下工农业用水流量 250m³/s，河口镇以上净增农田保灌面积 473 万亩。此外，还有防凌、养殖、旅游等效益。

设计单位 西北勘测设计研究院（现中国水电顾问集团西北勘测设计研究院）。

Lubuge Shuidianzhan

鲁布革水电站 (Lubuge Hydropower Station)

位于中国云南省罗平县与贵州省兴义市交界的黄泥河下游，距昆明市 320km，为引水式水电站，见图 1。电站装机容量 600MW，多年平均年发电量 28.49 亿 kW·h，以 220kV 和 110kV 电压输电线路接入云南省电力系统。



图 1 鲁布革水电站

水文和水库特性 坝址以上流域面积 7300km²，多年平均流量 164m³/s，多年平均年径流量 51.7 亿 m³。多年平均悬移质沙量 344 万 t，推移质约 10.49 万 t。挡水、泄水建筑物设计洪水标准为 500 年一遇，洪峰流量 6460m³/s，校核标准为可能最大洪水，洪峰流量 10 880m³/s。水库正常蓄水位 1130.00m，相应库容 1.11 亿 m³，死水位 1105.00m，为季调节水库。

工程地质条件 坝址区地层以白云岩为主。

枢纽布置 枢纽工程由大坝、泄水建筑物、引水发电系统等组成，见图 2。

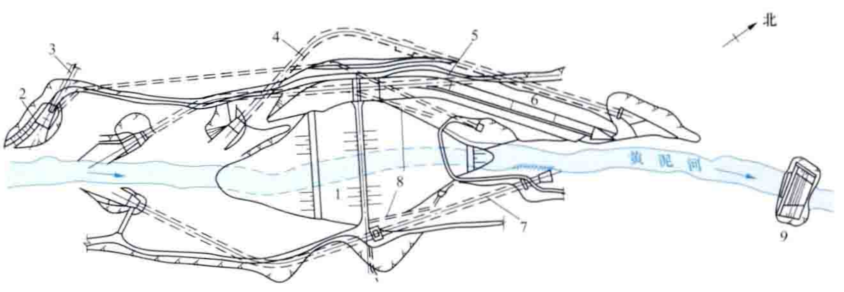


图 2 鲁布革水电站首部枢纽平面布置图

1—堆石坝；2—进水口；3—引水隧洞；4—左岸泄洪洞；5—导流洞；6—溢洪道；7—右岸泄洪洞；8—上坝交通洞；9—二道坝

大坝　土心墙堆石坝，坝顶高程 1138.00m，最大坝高 103.8m，顶宽 10m，顶长 217.17m，上、下游坝坡均为 1∶1.8。大坝用坝址附近玄武岩风化的砾石土做防渗心墙料。

泄水建筑物　由左岸开敞式溢洪道和左、右岸泄洪隧洞组成。2 孔溢洪道，单孔净宽 13m，泄槽全长 553m，堰顶高程 1112.60m，最大泄流量 $6424m^3/s$。左岸泄洪隧洞全长 723.83m，进口底板高程 1080.00m，圆形有压段直径 11.5m，无压段尺寸为 8.5m × 12.88m，最大泄流量 $1995m^3/s$。右岸泄洪隧洞全长 681.08m，进口底板高程 1060.00m，圆形有压段直径 10m，无压段尺寸 8.5m × 10.87m，最大泄流量 $1658m^3/s$。排沙洞 1 条，直径 5m，设计泄流量 $300m^3/s$。

引水发电系统　包括引水系统和厂房。

引水系统设在左岸，包括 1 条内径为 8.0m、长 9387m 的引水隧洞，一座带上室的差动式调压室（大井内径 13m，高 63.9m），2 条地下埋藏式斜井高压主管道（内径 4.6m，长 468.1m 及 469.5m）和 4 条支管（内径 3.2m）。

厂房设在地下洞室内，长 125m、宽 18m、高 39.4m，内安装有 4 台容量为 150MW 的混流式水轮发电机组。水轮机转轮直径 3.442m，额定水头 312.0m，额定出力 153MW，额定转速 333.3r/min，额定流量 $53.5m^3/s$，吸出高度 6.5m。机组最高效率 94.6%，设计点效率 93.4%。发电机为悬式空冷，额定出力 172MV·A，额定功率因数 0.875，额定电压 15.75kV，最大出力 198MV·A，最高效率 98.58%。220kV 主变压器为三相双绕组水冷钟罩式，每台容量 172MV·A，与发电机组成单元接线。1 台 60MV·A 三相自耦变压器将 220kV 电压降压，向 110kV 侧供电。220kV 和 110kV 高压配电装置均采用气体绝缘金属封闭电器（GIS）。

工程施工　首部枢纽采用围堰一次断流、隧洞导流、基坑全年施工方式。引水隧洞采用钻爆法、光面爆破开挖，平均月进尺 230m。混凝土衬砌采用针梁式钢模浇筑。地下厂房开挖采用钻爆法、光面爆破施工，除尾水洞外，厂区洞室的永久支护均采用锚喷支护。1983 年，鲁布革水电站是中国第一个利用世界银行贷款的水电工程，引水系统工程采用国际竞争性招标，第一次按国际惯例进行水电工程项目管理。

工程于 1982 年开工，1988 年底第一台机组发电，至 1991 年 6 月 14 日，4 台机组全部投产。

主要工程量：土石方明挖 152 万 m^3，石方洞挖 140 万 m^3，土石方填筑 223 万 m^3，混凝土浇筑 72 万 m^3，金属结构安装 5578t。

设计单位　昆明勘测设计研究院（现中国水电顾问集团昆明勘测设计研究院）。

lusheng shengtai baohu

陆生生态保护　(conservation of terrestrial ecology)

为缓解水电工程建设产生的不利陆生生态影响而采取的保护措施。

水电站建设陆生生态保护以维护区域生态系统结构和功能的完整性及稳定性为准则。陆生生态保护主要有避让、减缓、补偿和恢复 4 项措施。

避让措施　凡涉及不可替代、极具价值、极敏感、被破坏后难以恢复的生态保护目标时需采取的生态措施。水电站生态避免措施主要有合理选择坝址、水库水位，优化枢纽工程布置、施工场地和选择生态环境可行的移民安置区等。

减缓措施　对于水电站建设水库淹没和施工占地无法避让产生的生态破坏影响，需采取减缓措施，将对生态保护目标的影响降低到最低程度。水电站生态减缓措施主要有工程建设管理措施和生物保护工程措施，主要包括对工程占地区域的珍稀保护植物进行迁地保护，对珍稀保护动物及其幼体、卵等采取动物救护；对施工人员进行生态保护的培训和宣传教育，施工中的环境保护监督、监理，改善工程周边退化生境，以满足野生动物的需求。

补偿措施　永久性占用的森林植被等采取异地营造和抚育的补偿方式恢复，异地恢复补偿按《中华人民共和国森林法》的要求，由电站建设单位缴纳相应的补偿费用，由当地林业部门实施；鼓励地方政府对水库周边进行封山育林、营造防护林；对有保护价值的天然植被群落或集中分布的珍稀保护植物划定保护区等。

恢复措施　水电站施工临时占用的土地，在施工结束后依靠人工措施，辅以生态系统的自我调节能力与恢复能力，恢复其相应的生态功能。水电站需进行生态恢复的主要地域有施工料场、渣场和施工场地等。水电站水土保持植物措施也属于一种生态恢复措施。

lusheng shengtai yingxiang

陆生生态影响　(impact on terrestrial ecology)

水电工程对陆生生态系统及其生物因子、非生物因子所产生的作用。水电工程建设、水库淹没、移民安置活动对土地的占用等将改变区域陆生生态系统及其组成因子，由此而影响区域陆生生态系统功能。

陆生生态影响主要包括植被影响、植物影响、陆地动物影响、水土流失影响、土地利用和景观空间格局的变化影响等。部分水电工程可能会对自然保护区、风景名胜区、森林公园等生态敏感区等造成直接或间接影响；平原型水电站水库蓄水和运行后，库区周围可能发生土壤沼泽化、盐渍化和潜育化等；较大库容的水库可能影响局地气候，改变区域生态系统非生物因子，影响陆生生态系统的结构和功能。

植被影响　水电工程建设过程中运输车辆对地表的碾压、施工开挖、地表清理及施工占地等活动和水库蓄水，对植被类型、数量、面积、生物量、植被的可恢复性及生态系统等产生直接影响。面积较大的水库，将改变周边局地气候，对区域植被产生有利的影响。

植物影响　主要是施工过程中地表清理、表土开挖、施工占地，开挖、弃渣、施工过程的生产生活污染等施工活动和水库淹没将对植物种类、植物数量、植物区系、珍稀保护植物、名木古树等产生影响。施工过程中，工程建筑材料及其运输车辆的进入，施工人员的大量活动，可能会造成外来物种进入工程区域。

陆地动物影响　施工占地、开挖、爆破、运输、出渣等工程活动，以及施工产生的“三废”（废水、废气、固体废弃物）及噪声扰动施工区原有陆生动物的栖息生境，迫使该

区域的陆生动物迁往外地，对其生存、繁衍产生影响。工程运行期水库蓄水淹没，使原有栖息地改变，从而造成动物向库区附近地带迁移。

水土流失影响　水电工程因工程开挖、料场开采、弃渣、施工临时占地、移民安置等工程行为将扰动原地貌，损坏水土保持设施，产生弃渣，导致土壤侵蚀和水源涵养功能下降等，将对工程及周边区域土地生产力、生态环境、景观、河道水质、电站安全等造成不同程度的影响。

土地利用和景观空间格局变化影响　工程占地（永久占地和临时占地）、水库淹没、移民安置活动等造成土地利用方式和景观空间格局的变化，影响土地利用性质和土地资源。水电施工扰动和水库蓄水淹没原有植被，降低植被生产力和生物量，改变区域空间异质性，对生态干扰的抵御能力和受到干扰破坏以后的自我恢复能力变差，影响区域生态系统的稳定性。

参考书目

毛文永．生态环境影响评价概论．北京：中国环境科学出版社，2003.

Luobote-Bolasa Shuidianzhan

罗伯特-伯拉萨水电站

(Robert-Bourassa Hydropower Station)　原称拉格朗德二级水电站（La Grande Ⅱ Hydropower Station），位于加拿大魁北克省北部詹姆斯湾（James Bay）拉格朗德河下游，见图1。分两期开发，总装机容量7622MW，多年平均年发电量358亿kW·h。采用735kV特高压输电至蒙特利尔地区，输电距离1100km。



图1　罗伯特-伯拉萨水电站

水文和水库特性　拉格朗德河总流域面积9.8万km^2，平均年降水量750mm，多年平均年径流量536亿m^3。另从相邻的卡涅皮斯考（Caniapiscau）河和伊斯特门（Eastmain）河跨流域引水391亿m^3，使总年径流量达927亿m^3。坝址在河口以上117km处，多年平均流量2920m^3/s。正常蓄水位175.30m，相应库容617亿m^3，调节库容193.6亿m^3。连同上游拉格朗德三级、四级和卡涅皮斯考河的几座大水库，总调节库容达935亿m^3，库容系数达1.01，可以进行多年调节。水库移民淹没损失很小。

工程地质条件　主坝坐落在花岗岩基岩上。

枢纽布置　枢纽工程由大坝、泄水建筑物、厂房等组成，见图2。

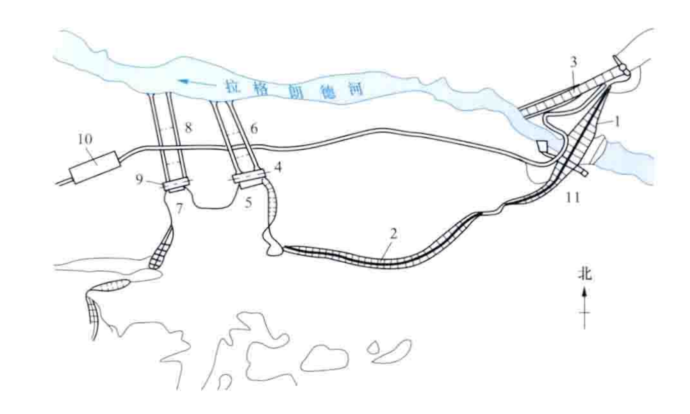


图2　罗伯特-伯拉萨水电站枢纽平面布置图

1—主土石坝；2—副坝；3—岸边溢洪道；4—一期地下厂房；5—一期进水口；6—一期尾水洞；7—二期进水口；8—二期尾水洞；9—二期地下厂房；10—开关站；11—导流隧洞

大坝　主坝为斜心墙堆石坝，全长2835m，最大坝高168m。沿水库周边建副坝30座，共长21km。

泄水建筑物　溢洪道建于主坝右侧，设8个溢流孔，孔口尺寸宽20m、高12m，用平面闸门控制，泄洪能力为16 280m^3/s，泄槽宽122m，开挖呈10个大台阶式，无衬砌。

厂房　两座地下厂房位于主坝左侧，压力斜洞直径8m。一期主厂房洞室长483.4m，宽26.5m，高47.3m。厂房的下游侧设尾水调压室，长451m，宽22m，高45m。4条尾水隧洞呈马蹄形断面，宽13.7m，高19.8m，长1220m。二期地下厂房位于一期下游1km处，主厂房长221.5m，宽25.3m，高34.5m。

一、二期地下厂房分别安装16台和6台混流式水轮发电机组，单机容量为351MW，额定水头分别为137.2m和138.5m，转轮直径分别为5.60、5.40m和6.10m，转速为133.3r/min和150r/min。水轮机进口用圆筒阀控制，直径7.60m。发电机额定容量370MV·A。电站采用地面变压器。一期地下厂房机组用电缆经16个直径为3.4m的电缆井印至地面变压器，升至735kV特高压，经开关站输出。二期地下厂房机组通过布置在地下的变压器升至315kV，然后经电缆井引至屋外开关站。

工程施工　工程于1971年开始施工准备，1973年开工，一期电厂1979年开始发电，至1982年机组全部装完。二期电厂1991年开始发电，1992年全部投产。

主要工程量：主坝土石填方2300万m^3，副坝填方2500万m^3，溢洪道进水口石方明挖840万m^3，导流隧洞石方洞挖86万m^3，一期地下厂房系统石方280万m^3，二期地下厂房开挖覆盖层72.9万m^3、石方271.2万m^3。



Manwan Shuidianzhan

漫湾水电站 (Manwan Hydropower Station) 位于中国云南省云县和景东县交界的澜沧江中游河段上，距昆明市公路里程455km，是澜沧江上第一个开发的大型水电站，见图1。电站装机容量1655MW，其中一期装机容量1250MW，二期装机容量300MW，田坝电站装机容量105MW。与小湾水电站联合调节后，多年平均年发电量77.41亿kW·h。电站出线分为3回500kV出线，4回220kV出线。已投运的分别走2回500kV线路至昆明草铺变电站、2回220kV线路至大理下关变电站、1回220kV线路至临沧新云变电站。

水库特性 1000年一遇设计洪水流量18 500m³/s，5000年一遇校核洪水流量22 300m³/s。水库正常蓄水位994.00m，相应库容9.2亿m³；校核洪水位999.40m，相应库容10.5亿m³；死水位982.00m，死库容6.63亿m³；防洪库容0.33亿m³；调节库容2.57亿m³，具有季调节性能。

枢纽布置 枢纽工程由大坝、泄水建筑物、厂房和田坝电站组成，见图2。

大坝 混凝土重力坝，全长418m，坝顶高程1002.00m，最大坝高132m。

泄水建筑物 枢纽采用以溢流表孔泄洪为主，左岸泄洪洞、左岸双底孔和左右岸冲砂底孔为辅的混合泄洪方式。表孔共5孔，堰顶高程974.00m，布置于河床中部，采用厂前大差动挑流方式消能。堰顶设有13m×20m的表孔检修门和弧形工作闸门。设计及校核洪水时，相应库水位分别为994.00m和999.40m，泄流量分别为11 981m³/s和17 480m³/s。水垫塘采用预开挖并用混凝土衬护。左岸泄洪隧洞为12m×15.5m的方圆形无压洞，进口高程965.50m，洞长355m，设计及校核泄流量分别为2348m³/s和2560m³/s。靠近左岸的坝体内设有双泄底孔，进口高程925.00m，孔口尺寸5m×8m，设计及校核泄流量分别为2512m³/s和2621m³/s。双泄底孔右侧设置一冲沙底孔，进口高程916.00m，压力段钢衬直径为6m，出口设3.5m×3.5m弧形工作闸门控制。右岸坝体下部设置一个右岸冲沙底孔，进口高程896.00m，闸门布置同右冲沙底孔，洞身也用钢板衬护，直径6m。



图1 漫湾水电站

厂房 一期工程厂房布置在溢流坝坝后，厂顶挑流。5条压力钢管直径均为7.5m。主厂房总长195m，宽34.5m，高59.9m。厂内安装5台单机容量为250MW的混流式水轮发电机组。水轮机转轮直径5.5m，额定转速125r/min，额定功率255.1MW，额定水头89m，额定流量316m³/s。发电机为半伞式、空冷，额定电压15.75kV，额定功率250MW，额定功率因数0.875。13台500kV单相双绕组升压变压器组成4组，每组300MV·A，1台备用。1台220kV三相升压变压器，容量300MV·A。4台500kV/220kV单相双绕组自耦变压器，单台容量150MV·A，作为系统间的联络，其中1台备用。220kV和500kV的GIS分别布置在左右岸非溢流坝坝后。

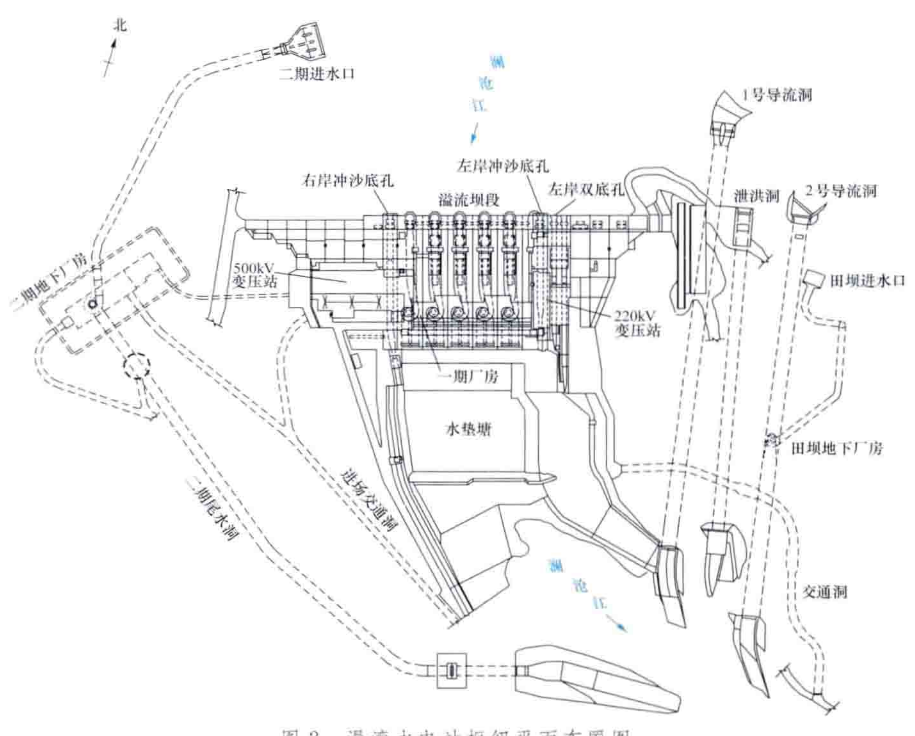


图2 漫湾水电站枢纽平面布置图

二期工程位于右岸，包括引水管道、地下厂房和尾水隧洞，地下主厂房长74m、宽26.6m、高69.4m，内装一台300MW水轮发电机组。水轮机转轮直径6.3m，额定转速115.4r/min，额定功率306.1MW，额定水头89m，额定流量389m³/s。发电机额定功率300MW，额定电压18kV，功率因数0.9。主变压器采用单相变压器组，单相变压器容量为120MV·A。经主变压器升压至500kV后采用500kV高压电缆与一期工程GIS母线连接。

田坝电站　利用漫湾水电站弃水进行发电的工程，将漫湾水电站左岸导流洞、施工交通洞、灌浆排水洞等洞室进行扩挖及贯通形成引水发电系统，电站进水口设置在水库左岸岸边，工作闸门6m×6m，设计水头22m。

工程施工　施工导流采用土石围堰一次断流、左岸隧洞全年导流方式。左岸2条导流隧洞平行布置，方圆形断面，尺寸为15m×18m。进口底板高程分别为890m和895.2m。

一期工程于1986年5月1日导流隧洞开工，1987年12月20日大江截流，1993年3月下闸蓄水，1993年6月30日第一台机组发电，1995年6月30日一期工程5台机组全部投产发电。二期工程于2004年3月30启动，同年7月进入主体工程施工，2007年5月18日二期工程300MW机组投产发电。

主要工程量：土石方明挖372.1万m³，石方洞挖89.8万m³，混凝土和钢筋混凝土259.1万m³，金属结构安装13 880t。

设计单位　昆明勘测设计研究院（现中国水电顾问集团昆明勘测设计研究院）。

maopen

锚喷 (anchoring and shotcreting)

采用锚杆、锚索、钢丝（筋）网和喷射混凝土加固岩（土）体的技术措施。根据地质条件，锚杆和喷射混凝土可单独使用，也可联合使用，有时喷混凝土还可加设钢筋网。锚杆和喷射混凝土层与围岩形成一个承载结构，共同工作，可有效地限制围岩变形的自由发展，调整围岩的应力分布，防止岩体松散坠落。锚喷也是新奥地利隧洞施工法的一项主要内容。

锚杆　在岩层中钻孔，设置锚杆，可把松动的岩块固定在稳定的岩层上，或者通过对锚杆的张拉作用，给岩层施加预应力，从而增大节理面或层理面间的摩擦力，提高岩层的整体性和稳定性。通常采用钢筋作为杆体材料。按锚固的形式，分机械型锚杆和胶结型锚杆。通过张拉锚杆对岩层施加预应力的称张拉型锚杆。

（1）机械型锚杆。主要是依靠深入钻孔内的锚头与孔壁岩石的摩擦力起锚固作用，又分楔缝式、倒楔式和内胀式等。①楔缝式锚杆的锚头是在杆端开一切槽，嵌入楔形块，插至孔底，然后打击锚杆，在楔块作用下使切槽张开，锚头卡紧孔壁。②倒楔式锚杆的锚头有一个斜面，配合一块内小外大的倒楔，用细铁丝捆在一起同时送入孔底，再用撞铁顶住倒楔，敲击撞铁，使倒楔楔紧。③内胀式锚杆有胀壳式和开缝式。胀壳式的锚头是由内侧带有锥形槽的胀壳和具有相应锥度的锥形螺帽组成，旋转锚杆使螺帽张开胀壳，卡紧岩石。开缝式锚管是用空心高强钢管制成的，锚管一端缩小呈锥形，以便打入钻孔。锚管壁很薄，直径较钻孔略大，当打入钻孔时，锚管受压产生径向变形和外压力，使锚管对岩层产生摩擦力，从而固定岩层。

（2）胶结型锚杆。主要是依靠胶结材料将杆体锚固于岩层的钻孔中，又分水泥砂浆锚杆和树脂锚杆。①水泥砂浆锚杆以钢筋作杆体，水泥砂浆作为胶结材料，与围岩连成整体。砂浆锚杆一般采用先向钻孔内注入水泥砂浆，然后插入锚杆的先注后锚法施工，也有的采用插入锚杆后，抽真空再用压力灌浆的先锚后灌法施工。采用楔缝式或倒楔式锚杆时，为防止锈蚀和围岩蠕变导致锚杆松动，也常需对锚孔注满砂浆。②树脂锚杆一般也以钢筋作杆体，用掺入一定填料的合成树脂作粘合剂，把杆体与岩石胶结在一起。这种锚杆的做法是，将不饱和聚酯树脂、填料及加速剂等按一定比例混合，与适量的用玻璃管隔开包装的固化剂共同装在容器内制成树脂药包，与锚杆体一起装入钻孔中，旋转锚杆体，将树脂药包搅碎，使固化剂、树脂、加速剂、填料等均匀混合，发生聚合反应，使树脂胶凝固化。

（3）张拉型锚杆。分为张拉锚杆和预应力锚杆，采用端头锚固的形式。张拉锚杆多用于临时支护，一般采用扳手拧紧螺帽形成张拉力，优点是承载快。预应力锚杆用于永久支护，通过张拉锚杆体，对岩层施加预应力，要求整个锚孔灌注黏结材料，保护锚杆体，避免锈蚀。

锚索　由锚头、高强钢丝（或高强钢绞线）和锚件组成，通过对高强钢丝或高强钢绞线施加预应力，对被锚固体提供主动支护抗力的结构。预应力锚索主要由内锚固段、外锚头和锚索体三部分组成。内锚固段也称内锚头，是预应力锚固的根基。常用的内锚头分机械型和胶结型。外锚头是钻孔孔口实现张拉和锁定的直接支撑件，根据预应力吨位和施工条件，可采用钢筋混凝土锚头或钢锚头。锚索体是联系内外锚头、承受张拉力的构件，由高强钢丝束或钢绞线制成。施工时先将内锚固段固定在钻孔中，再用千斤顶对锚索进行张拉，达到设计预应力吨位以后，加以锁定。为防止钢丝锈蚀，保证锚索长时间工作，需按要求对锚孔进行灌浆。大型预应力锚索首先用于大坝加固加高，以后逐步应用于边坡和地下洞室加固等方面。

钢丝（筋）网　由纵向和横向钢筋十字交叉通过绑扎或焊接制作而成的网。钢丝（筋）网敷在岩石表面可防止局部掉块，与喷射混凝土联合作用时可提高喷射混凝土的抗剪和抗弯强度，提高喷射混凝土的整体性。钢筋网网格一般为矩形，网格大小一般在150～300mm之间，钢筋直径通常为6～8mm。

喷射混凝土　通过混凝土喷射机，利用压缩空气将粗细混凝土骨料、水泥、水、掺合料和外加剂等组成的混合料，喷向岩石或其他受喷面，经凝结硬化成混凝土的施工工艺。喷射的混凝土与岩石紧密胶结，能有效地限制地下洞室中围岩的剥离和松散，调整应力分布，充分利用地层抗力。喷射混凝土类型分为干式喷射混凝土、湿式喷射混凝土、水泥裹砂喷射混凝土、钢纤维喷射混凝土等。

（1）干式喷射混凝土。将水泥、砂、石和速凝剂等材料，按一定比例配合成混合料，用压缩空气输送到喷头的喷嘴处再加水混合喷出。这种方法使用的喷射机结构简单、使用方便、输送距离远，采用得较多，缺点是粉尘大、回弹率

高、质量不易控制。

（2）湿式喷射混凝土。将水泥、砂、石和水等全部材料先行拌和后再喷射。这一方法可减少粉尘，回弹率低，混凝土质量较好，缺点是输送距离短，容易堵管。还有一种混合喷射法，在拌料时不加速凝剂，而是先加少部分水，大部分水和速凝剂一起在喷头处加入混合料中，然后喷射，效果较好。

（3）水泥裹砂喷射混凝土。将砂子调湿到一定含水率，加入全部用量的水泥，经过裹砂机搅拌，使砂粒表面包裹一层低水灰比的水泥浆壳，再加入拌和用水和减水剂制成水泥裹砂砂浆。用这种砂浆与粗骨料、速凝剂等在喷嘴处混合，无须另外加水，直接喷射。用水泥裹砂法喷射的混凝土质量好，粉尘少，回弹率低，节省水泥。

（4）钢纤维喷射混凝土。在喷混凝土的集料中按设计比例加入特定品种和规格的钢纤维，搅拌均匀后作为集料进行喷射并形成复合型混凝土。加入钢纤维后，喷射混凝土的抗压强度、抗折强度、抗弯强度及耐冲击性能均有较大幅度的提高，尤其适用于松软、破碎地层支护。钢纤维直径一般为0.3～0.5mm，长度以20～25mm为宜。由于钢纤维喷射混凝土造价相对较高，1995年以来，中国开始使用聚丙烯纤维（微纤维）喷射混凝土，取得了较好的效果。随后，以粗纤维（由非聚酯类合成纤维基材制成的当量直径大于0.1mm、长度为15～60mm的纤维）替代钢纤维的喷射混凝土也开始在水电、建筑行业逐步得到应用。

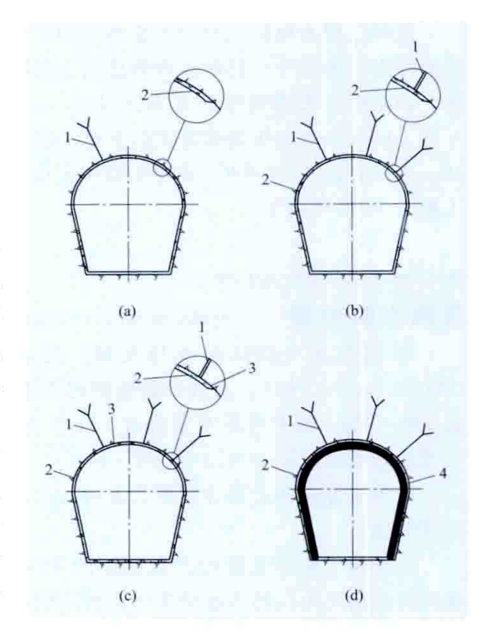
应用概况　在水电工程中，锚喷广泛应用于坝基和边坡岩石加固、水工隧洞的施工支护和永久性衬砌，以及高大地下洞室的支护加固等方面。

（1）坝基加固。自1934年法国在阿尔及利亚的乞尔法坝加高工程中，成功地应用大型预应力锚固后，这一方法就常用于大坝加高加固、坝基及边坡的抗滑稳定处理。中国于1996年在李家峡水电站左岸坝头岩基加固中，成功地应用了这一技术，单孔预应力锚索吨位最大达1000t。

（2）边坡支护。20世纪60年代以来，锚喷已被广泛采用于地下洞室、岩土边坡支护。锚喷技术已发展为边坡支护处理的重要手段。中国小湾水电站右岸600m的高边坡开挖过程中，边开挖边锚固，采用了预应力锚索、长锚杆、挂网喷射混凝土等多种锚固措施。在堆积体边坡，还采用了跟管钻进和注浆控制技术，在堆积体内成功钻设了深达60m的深孔锚索，保证了边坡安全。

（3）隧洞支护。锚喷不仅广泛用于隧洞施工期作为临时支护，也可用于作为永久性衬砌，以代替现浇混凝土。根据不同的地质条件，水工隧洞锚喷支护可采用不同的形式。有的采用局部锚杆或局部喷射混凝土，见图（a）；有的采用锚杆结合喷射混凝土，见图（b）；有的采用锚杆结合钢筋网喷射混凝土，见图（c）；有的采用锚喷加设钢筋网并设工字钢支撑，见图（d）。

（4）地下洞室支护。对于大跨度、高边墙的地下洞室，锚喷支护是有效的支护措施，常用于水电站的地下厂房、调压井等施工中。中国小浪底水电站地下厂房在顶拱部位用一期喷锚和二期1500kN预应力锚索支护，边墙部位用喷锚支护的形式；小湾水电站地下厂房在顶拱部位采用挂钢筋网或采用钢纤维混凝土进行加强支护；断层及其影响带采用挂钢筋网、预应力锚杆等进行加强支护。高边墙关键部位使用系统预应力锚索，其余部位考虑随机锚索；拉西瓦水电站地下厂房支护形式主要包括砂浆锚杆、预应力锚杆、喷钢纤维混凝土及无黏结式预应力锚索等；向家坝水电站地下厂房采取的锚喷支护形式主要有锚杆、喷混凝土、锚索。



水工隧洞锚喷支护形式示意图

（a）局部采用锚杆或喷射混凝土；（b）锚杆结合喷射混凝土；（c）锚杆结合钢筋网喷射混凝土；（d）锚喷加设钢筋网并设工字钢支撑

1—锚杆；2—喷射混凝土；3—钢筋网；4—工字钢支撑

Meiguo shuineng ziyuan

美国水能资源　（hydropower resources of United States）　依据1979年美国陆军工程兵团研究成果，美国的全部水能资源理论蕴藏量为44 880亿kW·h/a；技术可开发量为5285亿kW·h/a；经济可开发电量约3760亿kW·h/a。其水能资源主要分布于中西部地区。美国的水能资源开发利用主体为隶属于国防部的陆军工程师兵团（United States Army Corps of Engineers，USACE）、隶属于内务部的垦务局（U.S. Bureau of Reclamation，USBR）和田纳西流域管理局（Tennessee Valley Authority，TVA）。

美国国土面积937万km^2，本土地势东西两侧高，中间低。山脉走向为南北向，东部有阿巴拉契山地；西部有海岸山岭、喀斯喀特-内华达山脉和落基山脉等；中部为低地和平原。西北部沿海和东部沿海降水量较大，其余地区大致由东向西降水量逐步减少。受降水量和地形高差影响，美国水能资源在地区上分布很不均匀。西部11个州占全国62%，中部20个州占16%，大西洋沿岸18个州占18%，阿拉斯加和夏威夷州占4%。按流域统计，哥伦比亚河流域的水能资源最丰富，占36.8%；密西西比河流域占11.6%；大湖流域占6.6%；科罗拉多河流域占4.8%。

美国是世界上开发利用水能资源较早和较充分的国家。1882年开始建第一座小水电站；到1902年已建水电站装机容量1370MW，自20世纪30年代起大规模开发，到1950年已建18 675MW。1991年已建常规水电站74 418MW，年发电量2673亿kW·h，占技术可开发资源的50.6%，利用程度已很高。根据英国《国际水电与大坝》杂志2011年发布的《World Atlas》，美国2010年水电装机容量约78 200MW，年发电量2570亿kW·h，该年发电量占水能资源技术可开发年电量的49%左右。

美国已建水电站主要分布在西部的哥伦比亚河，其次为科罗拉多河和位于东部的密西西比河支流田纳西河和密苏里河。田纳西河水能资源开发率已过88%，哥伦比亚河超过70%。已建水电站中规模最大的是哥伦比亚河的大古力水电站，装机容量6494MW，多年平均年发电量248亿kW·h，工程于1980年竣工。

Mei Zhou shuineng ziyuan

美洲水能资源 (hydropower resources of America) 根据英国《国际水电与大坝》杂志2011年发布的《World Atlas》统计，美洲水能资源理论蕴藏量超过144 933亿kW·h/a，技术可开发量超过45 143亿kW·h/a，经济可开发资源量超过25 955亿kW·h/a。

美洲水能资源主要分布在北美的加拿大、美国和南美洲巴西等国。

北美洲平原和丘陵约占总面积的42%，大陆地形的基本特征是南北走向的山脉分布于东西两侧与海岸平行，大平原分布于中部。北美洲外流区河流除圣劳伦斯河外，所有大河都发源于落基山脉。落基山脉以东的河流分别流入大西洋和北冰洋，以西的河流注入太平洋。内流区河流主要分布在美国西部大盆地及格陵兰岛。南美洲地形分为3个南北向纵列带：西部为狭长的安第斯山，东部为波状起伏的高原，中部为广阔平坦的平原低地。安第斯山以西注入太平洋的河流源短流急，多独流入海。东部注入大西洋的河流大都源远流长，支流众多，径流丰沛，水能资源大都集中于大西洋水系的几条大河。

密西西比河是美国最大的河流，流域面积322万km^2，河长3767km，年径流5800亿m^3。密西西比河的开发主要以防洪、航运、发电为主，其二级支流田纳西河综合开发利用在世界上享有盛名，田纳西河干流自上而下规划了9级，总规模2020MW，多数在20世纪40年代就建成发挥作用。

哥伦比亚河是北美一条重要的国际河流，流域面积66.9万km^2，河长2000km，落差808m，河口年径流量2340亿m^3。哥伦比亚河流域可开发的水电站装机容量达到63 800MW，多年平均年发电量达2485亿kW·h。美国和加拿大在干流已经建成了14级水电站，总规模达到30 000MW。

南美洲有世界最大的河流亚马孙河。亚马孙河流域面积691.5万km^2，河长6299km，年径流量达69 300亿m^3，是世界上流域面积最广、径流量最大的河流。水系水能资源蕴藏量约279GW，干流流经亚马孙平原，比降平缓，不易开发，可开发的水能资源主要分布在位于巴西、秘鲁、玻利维亚、厄瓜多尔、哥伦比亚等国的支流上。由于水能资源分布于森林茂密的边远地区，开发利用程度还很低。

巴拉那河又称拉普拉塔河，流域面积310.3万km^2，河长4100km，年径流8000亿m^3，干流流经巴西、巴拉圭、阿根廷等国，注入大西洋。水系水能资源蕴藏量约65GW，主要集中在巴西和巴拉圭境内，初步规划大中型水电站装机规模85.18GW，多年平均年发电量3467亿kW·h，其中干流规划10级开发，装机规模37 870MW，多年平均年发电量约1800亿kW·h，已建成6座水电站，装机规模25 740MW，其中伊泰普水电站装机14 000MW，多年平均年发电量900亿kW·h，是已建成水电站中仅次于长江三峡水利枢纽的世界第二大水电站。

Min Jiang shuixi shuineng ziyuan

闽江水系水能资源 (hydropower resources of Minjiang River System) 根据《中华人民共和国水力资源复查成果（2003年）》统计，闽江水系水能资源理论蕴藏量为548.03亿kW·h/a，占中国水能资源的0.90%；其中技术可开发量205.01亿kW·h/a，占中国水能资源的0.82%。闽江流域雨量充沛，河流陡峻，干支流的水能资源都较丰富。干流（包括上游的沙溪）水能理论蕴藏量193.63亿kW·h/a，占全水系的33.55%。技术可开发水能资源78.74亿kW·h/a，占全流域的38.58%。支流的水能理论蕴藏量383.44亿kW·h/a，占全水系的66.45%；技术可开发水能资源125.34亿kW·h/a，占全流域的61.42%。

闽江为福建省的第一大江，发源于宁化县与江西省交界的杉岭山，干流上游为沙溪，在沙溪口纳富屯溪后为西溪，在南平纳建溪后始称闽江。闽江流域面积60 992km^2，干流长541km，落差730m，多年平均年径流量621亿m^3。

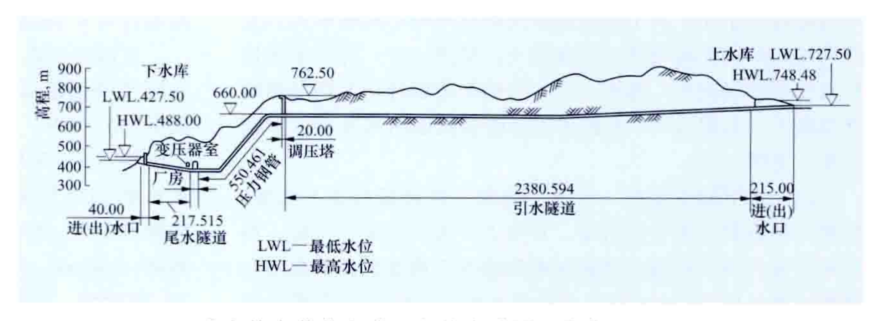
全水系装机容量最大的水电站为干流上的水口水电站，装机容量1400MW，约为全水系已、正开发装机容量的38%。技术可开发装机容量100MW以上的支流有富屯溪及其支流金溪，建溪及其支流松溪、尤溪、古田溪、大目溪、大樟溪等。

闽江水系已建成10座大中型水电站，总装机容量已达3691MW，多年平均年发电量142.47亿kW·h，占技术可开发资源的70%，主要有水口、沙溪口和古田溪梯级等水电站。

Minghu Choushui Xuneng Dianzhan

明湖抽水蓄能电站 (Minghu Pumped Storage Power Station) 位于中国台湾省中部的日月潭风景区，装机容量1000MW，以345kV超高压输电线路接入台湾电力系统，担负系统填谷调峰任务，增加系统备用容量，提高系统的运行可靠性和灵活性。

枢纽布置 枢纽工程由上水库、下水库、水道系统、厂房等组成，见图。



明湖抽水蓄能电站工程总布置图（单位：m）

上水库　以日月潭为上水库。建有2座混凝土心墙土坝，高度分别为19m和22m，长度分别为300m和150m。最高水位748.48m，最低水位727.50m，调节库容1.424亿m^3。

下水库　在水里溪上修建一座混凝土重力坝壅高水位形成下水库。最高水位488.00m，最低水位427.50m，调节库容740万m^3。坝顶高程450.50m，坝高57.5m，顶长169.5m。坝下设有2条冲沙泄水道，断面尺寸4m×4m，底部高程404m。设有1条岸边溢洪道，总长224m，泄槽宽15～22m。

水道系统　进水口位于上水库西岸，底坎高程718.00m。2条引水隧洞均为圆形断面，直径7m。隧洞末端各设1座阻抗式调压井，由直径12m、高86.5m的竖井和顶部直径30m、高12.5m的上室组成。调压井后分出2条高压管道，内径由7m渐变为5.8m，每条再分出2条支管，内径由4m渐变至2.7m。尾水隧洞内径5.5m，共4条。

厂房　地下式厂房，位于水里溪左岸山体内。厂房长127.2m，宽21.2m，高45.5m。安装4台可逆式水轮发电机组。主变压器洞室长104m，宽13m，高14.4m，与主厂房中心线平行。抽水蓄能机组由竖轴混流可逆式水泵水轮机和竖轴半伞式三相交流同期发电电动机组成，单机容量250MW，转速为300r/min，吸出高度为－38m。水轮机工况，最大净水头316.5m，最小净水头269.5m，最大流量95m^3/s；水泵工况，最大扬程326m，最小扬程283m，最大抽水流量82m^3/s，最大输入功率265MW。发电电动机的额定发电容量为280MV·A，频率60Hz，电压16.5kV。电动机起动方式，1号和3号机组采用辅助电动机起动，2号和4号机组采用背靠背同步起动方式。4台室内特殊式三相变压器，电压为16.5kV/345kV，单台容量480MV·A。高压配电装置采用345kV，室外型气体绝缘断路器。

工程施工　工程于1981年4月开工，1985年1月第一台机组投运发电，同年8月竣工。

建设单位　台湾电力公司。

mingqu buhengdingliu

明渠不恒定流　(unsteady flow in open channel)

渠道或天然河道各断面的流速（或流量）和水深（或水位）随时间（t）及地点（S）而变化的水流运动。又称明渠非恒定流。河道中洪水波传播、水电站日调节下游河道流态、河口潮汐流动、堤坝溃决时的水流运动等皆为明渠不恒定流。

明渠不恒定流属于水动力学中的波动，其特点是波形平缓，$L/h>20$（L为波长，h为水深），水深相对较浅，水的质点有平面移动，称为浅水移动长波。当波动变化过程缓慢、瞬时水面坡度很小、流线近于平行的直线时为连续波，其水力因素（水深、流量、流速等）是时间和地点的连续函数，称为渐变不恒定流，如河道洪水波及水电站日调节不恒定流。当波动变化过程迅速、断面上的水深和流速急剧变化、局部瞬时水面线坡度很陡甚至形成阶梯状时，其水力因素不是时间和地点的连续函数，则为不连续波或立波，称为急变不恒定流，如溃坝波或水体突然泄放。

一维不恒定流　明渠不恒定流的研究始于18世纪。1788年J.L.拉格朗日（J.L.Lagrange，1736－1813）创立浅水波理论。1871年法国人A.J.C.B.de圣维南（A.J.C.B.de Saint Venant，1797－1886）根据质量守恒与动量守恒原理提出一维渐变不恒定流方程组

连续方程 $$\frac{\partial Q}{\partial S}+\frac{\partial A}{\partial t}=q \tag{1}$$

动量方程 $$i-\frac{\partial h}{\partial S}=\frac{1}{g}\frac{\partial v}{\partial t}+\frac{v}{g}\frac{\partial v}{\partial S}+\frac{v^2}{C^2R} \tag{2}$$

式中Q为流量；A为过水面积；S为距离；t为时间；q为区间入流量；i为河段底坡；h为水深；g为重力加速度；v为断面平均流速；C为谢才系数；R为水力半径。

明渠不恒定流的研究方法有水力模型法和数值计算法等。解决一维不恒定流问题多用数值计算法。圣维南方程组为一阶拟线性双曲型偏微分方程，难于直接求解。工程规划设计中一般用特征差分或直接差分等数值计算法求解。直接差分法又分为显式差分法与隐式差分法两类。显式差分法假定时段末瞬流态的沿程变率用时段初瞬值代替，流态时间变率用流段中断面数值表示，方程中非偏导数因子以时段初瞬流段中断面数值代入，因此可根据前一瞬时各点的已知量逐点分别求解下一瞬时的未知量，计算较简便。当时间步长Δt与距离步长ΔS足够小时，这种假定引起的误差是很小的。隐式差分法不作上述假定，而是联解n个差分方程，同时求出下一瞬时各点的未知量，计算工作量较大，但隐式差分法的稳定性比显式差分法好，应用范围较广。当水力因素随时间和地点变化比较缓慢时，不恒定流问题（如洪水传播）可采用忽略圣维南方程组的惯性项与流速水头项的简化法，如瞬态法或简化差分法。

上列方程组的求解除需要纵横断面及糙率资料外，还需给定起始条件和边界条件。起始条件为计算初瞬河道沿程的水深（或水位）和流速（或流量）状态的数据。边界条件为河段两端断面的流量过程、水位过程或水位流量关系数值。

平面二维不恒定流　对河口潮汐水流及平原洪泛区洪水演进，除需了解沿主流方向的流速及水深外，尚需研究横向水流扩散、回流及两岸淹没范围和水深等，因此需按二维渐变不恒定流方程组用有限元等数值计算法求解。其方程组如下

$$\frac{\partial Z}{\partial t}+\frac{\partial (uh)}{\partial x}+\frac{\partial (vh)}{\partial y}=0 \tag{3}$$

$$\frac{\partial u}{\partial t}+u\frac{\partial u}{\partial x}+v\frac{\partial u}{\partial y}+g\frac{\partial Z}{\partial x}+g\frac{n^2u\sqrt{u^2+v^2}}{h^{4/3}}-K\sqrt{u^2+v^2}\frac{\partial v}{\partial x}=0 \tag{4}$$

$$\frac{\partial v}{\partial t}+u\frac{\partial v}{\partial x}+v\frac{\partial v}{\partial y}+g\frac{\partial Z}{\partial y}+g\frac{n^2v\sqrt{u^2+v^2}}{h^{4/3}}-K\sqrt{u^2+v^2}\frac{\partial v}{\partial y}=0 \tag{5}$$

式中x、y分别为直角坐标系的横、纵坐标；u、v分别为x、y方向的流速分量；Z、h分别为（x，y）处的水位与水深；$g\frac{n^2u\sqrt{u^2+v^2}}{h^{4/3}}$及$g\frac{n^2v\sqrt{u^2+v^2}}{h^{4/3}}$分别为$x$、$y$方向的水流运动阻力，其中$n$为曼宁糙率系数；$K\sqrt{u^2+v^2}\frac{\partial v}{\partial x}$、$K\sqrt{u^2+v^2}\frac{\partial v}{\partial y}$分别为$x$、$y$方向的水流运动局部阻力，当

来流速度超过计算单元本地流速时，K 值为正，一般模型中取为 0.4，否则为零。

二维不恒定流方程组中的动量方程的离散一般采用高分辨率和高稳定性的特征分裂格式，用有限元等数值计算求解。

二维不恒定流计算所需资料，除与一维计算相同者外，还需知道其初边值条件的横向分布。水工模型试验也是解决二维不恒定流的有效方法。

三维不恒定流计算仍在研究探索中。

mingqu shuilixue

明渠水力学

（open channel hydraulics） 研究重力作用下具有自由面的河渠水流运动规律的学科。是水力学的分支学科。明渠水流的特点是具有自由水面。明渠水力学的研究内容主要有明渠内形成的各种形式的水面线（水深）及断面流速分布等，考虑的边界条件包括：上游来流量变化或河渠断面形状、边壁糙度和渠底坡度变化，或下游控制条件改变，以及其他外来扰动加之于水面。

明渠包括棱柱形断面的人工渠道和非棱柱形的天然河道。明渠水流分为两大类：水力因素（水深、流速、比降等）不随时间而变化的为明渠恒定流（亦称定常流）；水力因素随时间而变化的为明渠不恒定流（亦称非定常流）。

明渠恒定流 分为两类：水力因素沿程不变的为恒定均匀流；水力因素沿程变化的为恒定非均匀流。

恒定均匀流 水力因素不随时间和沿程而改变。常用A. 谢才（A. Chezy）公式表达

$$v=C\sqrt{RJ}$$

其中

$$C=\sqrt{\frac{8g}{\lambda}}=\frac{1}{n}R^{1/6}$$

式中 v 为流速，m/s；C 为谢才系数；R 为水力半径，m；J 为能坡（在恒定均匀流中，J 等于明渠底坡 i）；λ 为阻力系数；n 为边壁糙率系数。

恒定非均匀流 水力因素不随时间变化，但随沿程变化，又分为恒定渐变流和恒定急变流两种。

（1）恒定渐变流。能量方程式为

$$i\,\mathrm{d}S=\cos\theta\,\mathrm{d}h+\mathrm{d}\left(\frac{\mathrm{d}v^2}{2g}\right)+\mathrm{d}h_f+\mathrm{d}h_j$$

式中 i 为底坡；S 为沿程距离；沿程水头损失 h_f 可借用均匀流的谢才关系式；局部水头损失 $h_j=\sum\zeta\frac{v^2}{2g}$（$\sum\zeta$ 为损失系数）；θ 为坡角。由上式导得明渠渐变流水深的沿程变化为

$$\frac{\mathrm{d}h}{\mathrm{d}S}=\frac{i-\frac{Q^2}{K^2}+\left(\alpha+\sum\zeta\right)\frac{Q^2}{gA^2}\left(\frac{\partial A}{\partial B}\times\frac{\mathrm{d}B}{\mathrm{d}S}\right)}{\cos\theta-\left(\alpha+\sum\zeta\right)\frac{Q^2B}{gA^3}}$$

其中

$$K=AC\sqrt{R}$$

式中 Q 为流量，m^3/s；α 为动能修正系数；A 为过水断面面积，m^2；B 为过水断面水面宽度，m；K 为明渠流量模数；其余符号含义同上。

（2）恒定急变流。常见的明渠过渡流态有：从缓流到急流的过渡（如跌水、堰流等），见图；从急流到缓流的过渡（如水跃）；变宽度河渠中的流动；弯道水流（急流时可见冲击波）等。急变流常是三维流动，伴有明显的能量损失，宜用动量原理或通过模型试验解决。



跌水

明渠不恒定流 天然河渠中的水流几乎都是时间上不恒定和空间上非均匀的流动，如：暴雨形成的径流；河渠中洪水波运动（伴有河床冲淤变化的洪水演进问题）；堤坝失事后的溃坝波；库岸或江岸滑坡激起的涌浪；海滨的潮汐、海啸；水电站或水泵站启闭过程中，上下游引水渠中水位、流量的变化；通航建筑物及灌溉系统充泄水时变水头出流等。（见明渠不恒定流）

参考书目

Chow Ven Te. Open Channel Hydraulics. New York: McGraw-Hill Publishing Co., 1959.

清华大学水力学教研组．水力学．北京：高等教育出版社，1981.

Mingtan Choushui Xuneng Dianzhan

明潭抽水蓄能电站

（Mingtan Pumped Storage Power Station） 位于中国台湾省中部日月潭西岸，总装机容量 1600MW，担负电力系统削峰填谷任务。

枢纽布置 枢纽工程由上水库、下水库、水道系统、厂房等组成，见图。

上水库 以日月潭为上水库。最高水位 748.48m，最低水位 727.50m，调节库容 1.424 亿 m^3。

下水库 位于明湖抽水蓄能电站下水库下游约 4km 的车埕村附近。最高水位 373.00m，最低水位 345.00m，库容 1200 万 m^3。大坝为混凝土重力坝，坝高 61.5m，顶长 314m。坝底设有 4 条排沙道，坝上设有 3 孔表孔溢洪道，总泄洪量 $2500m^3/s$。

水道系统 进水口设于日月潭西岸，闸门底坎高程 715.00m，门宽 55.4m。2 条引水隧洞，直径 7.5m，长度分别为 3104m 和 3169m，用钢筋混凝土衬砌。隧洞下游端设阻抗式调压井，竖井直径 14m、高 150.2m，上室直径 27m、高 15m。调压井后接 2 条压力钢管，直径为 6.8m；每条再分为 3 支直径为 2.78m 的岔管，进入厂房。6 条有压尾水隧洞，圆形断面，直径 5m。出水口位于下水库坝左岸下游约 10km 处，为钢筋混凝土结构，宽 90m、高 7.95m。设有 6 扇平面闸门。

厂房 位于下库坝左岸山体内，洞室为马蹄形断面，宽 20m，高 46m，洞长 156m。变压器室洞与厂房洞平行，长 169m，宽 12m，高 18m。开关站位于下水库右岸。厂房内

明潭抽水蓄能电站工程总布置图

安装混流式水泵水轮机 6 台，额定水头 380.0m，额定转速 400r/min。发电引水流量 $492m^3/s$，抽水输水流量 $426m^3/s$。抽水工况单机最大输入功率 280MW，发电工况单机最大出力 275MW。6 台半伞式发电电动机，额定参数为：电压 16.5kV；转速 400r/min；发电容量 300MV·A，功率因数 0.9；电动机功率 283MW。电动机起动采用静止式变频装置和背靠背同步两种方式。6 台屋内特殊式三相变压器，单台容量 300MV·A，额定电压 16.5/345kV。断路器为 345kV 气体绝缘屋外型断路器。

工程施工 工程 1987 年 9 月动工，1995 年竣工。

muban

模板 (formwork)

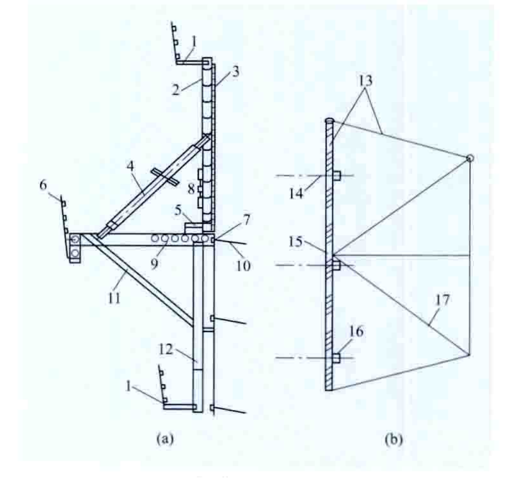
在混凝土工程施工中，用以控制混凝土拌合物，使之按要求成型的构造设施。模板构造一般包括面板和支承体系两个主要部分。面板与混凝土直接接触，以控制结构物体型。支承体系则包括用以固定面板和支承结构的梁、柱、桁架、斜撑、拉条以及纵横带等联系杆体。模板的制作、安装、使用和拆除，是混凝土施工中的重要工序，对混凝土工程的造价和施工速度有较大的影响。对模板的要求是：①保证混凝土结构物的形状、尺寸与相互位置的正确性。②具有足够的强度、刚度和稳定性，能可靠地承受施工过程中的各种载荷，并保证变形不超过允许范围。③表面光洁、平整，接缝严密，不漏浆。④尽量做到定型和系列化，拆装方便，可多次周转，并有利于混凝土工程的机械化施工。

分类 方法主要有：①按所采用的材料分，有木模板、钢模板、胶合板模板、胶木模板、预制混凝土模板、塑料模板等；②按模板受力状态分，有只承受混凝土拌合物侧压力的非承重模板和承受混凝土重力的承重模板；③按结构支承形式分，有靠支撑、拉条保持稳定的普通模板，有靠悬臂梁或桁架保持稳定的悬臂模板、半悬臂模板，有靠自重保持稳定的重力式模板，还有靠钢筋骨架承重的模板；④按模板拆移方式分，有普通模板、滑动模板、自升模板、钢模台车、针梁模板等；⑤按模板功能分，有普通模板、真空模板、保温模板、电热模板、装饰混凝土模板以及用于离心浇筑的旋转模板等。此外，有用砌砖或土模作为成型的构造设施的。模板选型主要根据建筑物的结构形式和模板拆装方式确定，尽量采用轻型化、定型化、系列化的模板。

水力发电工程常用模板 水力发电工程除与工业民用建筑采用相同的普通模板外，常采用定型组合钢模板、悬臂模板、预制混凝土模板、滑动模板、隧洞用模板及胶合板模板等。

定型组合钢模板 具有质量小、不易漏浆、成本低，可充分利用施工机械，加快立模速度，增加周转次数以及混凝土表面平整、光滑等优点，广泛使用于一般混凝土工程中。模板包括平面模板、拐角模板。

悬臂模板 以支承在已浇的混凝土上的悬臂钢梁或桁架承受和传递混凝土的侧压力，可以不用拉条，适于在仓内用机械进行混凝土施工，模板拆装快、周转次数多，广泛用于大中型混凝土坝工程。面板的倾角通过调节可变支杆的长度来控制。面板的水平和铅直调整分别通过设置在下部的横梁和竖梁的调节装置来完成。多卡模板是一种典型的悬臂模板，在长江三峡水利枢纽施工中广泛使用[见图(a)]。碾压混凝土坝施工时，为适应其连续、快速施工的需要，



悬臂模板示意图

(a) 多卡模板；(b) 翻升模板

1—工作平台；2—竖围囹；3—面板；4—螺杆；5—连接模块；6—主工作平台栏杆；7—定位锥；8—调节器勾头螺栓；9—主工作平台；10—锚筋；11—三脚架；12—悬挂；13—连接件；14—锚杆；15—锚面板；16—套筒螺栓；17—桁架

一般采用翻升模板［见图（b）］。翻升模板由两块模板通过活动铰连接，能交替连续上升。还有一种在悬臂模板的基础上发展起来的自升模板，它是在悬臂模板的背后设有提升柱和提升机构，利用提升柱使模板自行提升。美国在德沃夏克（Dwor-shak）坝，苏联在托克托古尔（ток-тогупь）坝施工中，均采用了自升模板。

预制混凝土模板　在工厂或现场就地预制的混凝土或钢筋混凝土模板。这种模板一般不再拆除，即作为结构物的表面部分，外形尺寸及混凝土表面平整度必须达到设计要求。较常用的有：①重力式混凝土模板，依靠自重保持稳定，用于大坝表面；②钢筋混凝土承重模板，用于底孔顶板或结构物的倒悬部分；③异形模板，用于结构形状比较特殊的部位，如坝内廊道、排水井以及其他孔洞等处。

滑动模板　借助机械牵引，随着混凝土浇筑逐步滑动的模板。采用滑动模板可以连续浇筑，模板滑动方向可以是垂直的，也可以是倾斜或水平的。滑模宽度（沿滑动方向）与合理的滑动速度和混凝土脱模时间相适应，一般为1.0～1.5m，混凝土拌和、运输和入仓手段也要满足相应的浇筑强度要求。滑模结构应有足够的强度、刚度和稳定性，分有轨滑模和无轨滑模。在水电工程中，常用于竖井、斜井、闸墩、隧洞衬砌、溢洪道、大坝溢流面等混凝土工程及混凝土面板堆石坝面板的施工。

隧洞用模板　隧洞混凝土衬砌除可用普通模板或滑动模板外，还可用钢模台车或其他专用设备。钢模台车是由钢模板和可移动的车架组成的专用设备，模板以车架为支承进行装拆，台车可在轨道或已浇筑好的混凝土上行驶。中国鲁布革和广州抽水蓄能等水电站在引水隧洞施工中使用针梁模板，这种设备无须铺设轨道，适用于隧洞全断面衬砌。

胶合板模板　胶合板模板质量小、韧性好、保温性能好、表面光滑、容易脱模，使混凝土表面平整，可用于清水混凝土模板。主要有木胶合板和竹胶合板。



nisha ceyan

泥沙测验 (sediment measurement) 对河流中随水流运动的泥沙数量和变化过程的直接观测，是水文测验的一个主要项目。泥沙资料是河道治理，水资源开发、利用和管理的基本资料，也是进行泥沙科学研究的重要依据。泥沙测验的内容包括悬移质泥沙测验、推移质泥沙测验、床沙测验和泥沙颗粒分析。

悬移质泥沙测验 包括断面输沙率测验（简称断沙测验）和单样含沙量测验（简称单沙测验）。断沙测验的目的是准确推求断面平均含沙量，测次控制在10～25次，主要布置在洪水期，以能建立良好的单沙和断沙关系曲线为原则。断面上采样垂线数目和位置要能控制含沙量的横向变化。在垂线上采取水样的方法有积点法、定比混合法和积深法等。单沙测验取样位置一般要通过输沙率测验资料分析选定。在所选位置上测得的单沙要能在较长时段内和断沙具有良好的相关关系，且取样简便。单沙测次要能控制含沙量变化过程，准确推算出全年逐日平均输沙率，汛期2次以上，枯期有沙时每天不少于1次。

悬移质测验仪器常用的有瞬时式和积时式两种。瞬时式采样器主要有横式采样器，其优点是结构简单，使用方便，但采样历时短，不能克服泥沙脉动影响，所取水样代表性差。积时式采样器有调压式、皮囊式、瓶式等。积时式采样器结构相对复杂，但取样历时长，能克服泥沙的脉动影响。此外还有自动测沙的光电测沙仪、超声波测沙仪、同位素测沙仪、震动测沙仪等，可以连续自动测量水中悬移质含沙量。这些仪器均处于不同的发展阶段，有各自的适用范围和特点，中国尚未在水文测验中正式推广使用。

推移质泥沙测验 包括测定每秒通过测沙断面的推移质数量，并通过与其他水文要素寻求关系，推算出推移质输沙量。直接进行推移质输沙率测验的方法有器测法和坑测法。器测法是将推移质采样器直接放在河床面上采集推移质样品，应用较广。坑测法是在河床上设置测坑，测定推移质，只在特殊需要时采用。

推移质输沙率的测次，随着河床组成性质不同而定。床沙粒径小于2mm的沙质河床，由于沙质推移质输沙率与水力因素存在密切关系，测次少些；床沙粒径大于等于2mm的砾石、卵石河床，因水力因素与推移质输沙率的关系往往不密切，测次一般按水位或流量变化过程而定。

推移质输沙率测验垂线数量要反映推移质输沙率的横向变化。在强烈推移带，垂线加密。每条垂线上重复取样2～3次，以消除推移质的脉动影响。用器测法施测推移质，由于仪器放到床面后，改变了床面的水流结构，因而测验成果不能完全反映实际情况，必须进行修正。

推移质输沙率与流速的高次方成正比，因此它的沿程变化剧烈。相邻河段，如果断面流速不同，两者的推移质输沙率相差悬殊。因此，河流推移质输沙率资料，只在某些重点测站上通过直接测验加以收集。

推移质测验的其他方法，国际标准中还列举了差测法、沉淀法、沙丘追踪法、遥测法、示踪法等。这些方法测量的准确性较差，测量难度大，应用极少。

床沙测验 包括河床质泥沙取样和颗粒分析。用来分析研究河流造床泥沙的横向和沿程分布、河床冲淤变化、估算河床糙率等；根据河床质的组成，还可分析泥沙来源。

床沙取样方法按河床组成的性质不同而异。沙质河床采用器测法，用钻管式采样器直接采取不同深度的样品。卵石河床可用试坑法，每个试坑在揭取表层样品后，下面再分3层取样。表层样品的取样方法有网格法、面块法和横断面法。网格取样法是将一网格紧贴在床面上，采集每个网格交点下的单个颗粒，合成一个样品；面块法取样是在所选取的面积内采取表层的全部颗粒作为样品；横断面取样法是在取样断面上拉一横线，拾取沿线下面的全部颗粒合成一个样品。

床沙测验一般与悬移质和推移质泥沙测验中作颗分的测次同时进行，在施测推移质和悬移质输沙率的垂线上取样。每个沙样的沙重应满足颗粒分析要求。

泥沙颗粒分析 测定沙样中各种粒径泥沙质量占沙样总重的百分比，据此绘出的曲线图为颗粒级配曲线。分析方法有直接法和间接法，按泥沙粒径和水样沙重选用不同的方法。直接法又分尺量法和筛分析法，粒径大于32mm的用尺量法，粒径介于0.062～32mm范围的用筛分析法，粒径小于1.0mm的用间接法。间接法是通过测定泥沙在水体中的沉降速度，根据沉速与粒径关系求得粒径。一般应用方法有粒径计法、吸管法、消光法（或称光电颗粒分析仪法）、激光法、离心沉降法。粒径计法和吸管法的设备简单，操作简便，在水文测站应用较广。光电和激光颗粒分析技术发展较快，已有不少定型产品，在实验室和水文测验中得到推广应用。

nisha chenjiang sudu

泥沙沉降速度 (sediment settling velocity) 单颗粒泥沙在静止的清水中等速下沉时的速度。泥沙颗粒在静水中下沉时，其运动状态与沙粒雷诺数 $Re_d=\omega d/\nu$ 有关。式中 ν 为水的运动黏滞性系数，d、ω 分别为泥沙的粒径与沉速。

当 $Re_d<0.5$ 时，沉降运动属层流状态，泥沙沉速可以用下式计算

$$\omega=\frac{1}{18}\times\frac{\gamma_s-\gamma}{\gamma}\times\frac{gd^2}{\mu}$$

式中 γ_s、γ 分别为泥沙和水的容重；μ 为水的动力黏滞系数；g 为重力加速度；d 为泥沙的粒径。

当 $Re_d>1000$ 时，运动属紊流状态，ω 用下式求得

$$\omega=1.72\sqrt{\frac{\gamma_s-\gamma}{\gamma}gd}$$

过渡区尚无理论解，不同学者曾提出一些半经验性公式。影响泥沙沉速的主要因素有泥沙颗粒的形状、水质及含

沙量等。试验的结果表明，即使在层流状态下泥沙颗粒的几何形态对沉速的影响也是明显的，而且颗粒越粗（粒石、卵石等）影响越大。水质主要表现在对 $d<(0.01\sim0.02)$ mm 的细颗粒泥沙有影响。在一般河水中，这样的细颗粒往往并非单颗粒下沉，而是产生絮凝现象（细颗粒泥沙之间由于吸附水膜的作用及水和泥沙的电化学性质的作用而结合成一集合体的现象），结成一团下沉，其下沉速度远大于单颗粒泥沙。含沙量对沉速的影响十分复杂。沉速不仅与含沙量的高低有关，而且与泥沙颗粒的粗细有关。对于处在分散状态的粗颗粒泥沙，由于不存在絮凝现象，当含沙量逐渐增大时，沉速因泥沙下沉时诱发的向上水流的影响而逐渐减小。对于细颗粒泥沙，因絮凝作用，沉速将从清水单颗粒开始，逐渐增大。当沉速达到一个峰值后，又因浑水黏滞性的加大而使沉速再度减小。

参考书目

钱宁，万兆惠．泥沙运动力学．北京：科学出版社，1983.

武汉水利电力学院河流泥沙工程学教研室．河流泥沙工程学．北京：水利出版社，1981.

nisha moxing shiyan

泥沙模型试验

（sediment model test） 研究泥沙问题的实体模型试验方法。是在遵循水流泥沙运动相似准则的基础上，用来研究水利水电枢纽工程、工农业引水口建筑物或其他局部河段平面形态变化和河槽冲淤变化的模型试验。泥沙模型试验一般采用动床模型。动床模型是指模型水流挟带泥沙，河床在水流作用下发生变形的模型。泥沙模型试验满足模型相似最为重要。

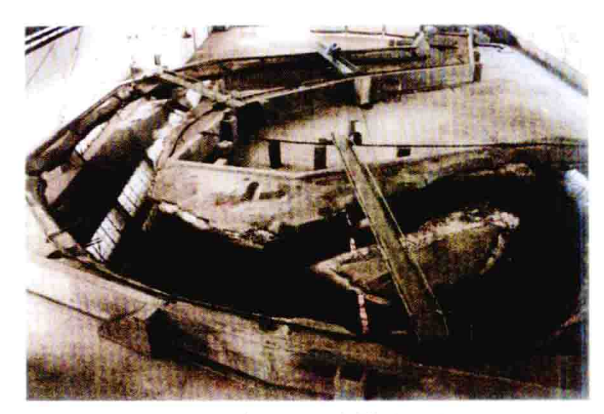
模型相似　泥沙模型试验除满足水流运动相似条件，即河槽边界条件几何相似、水流流态相似、水流阻力相似、弗劳德（Froude）数相等条件外，同时还要满足泥沙运动相似条件，悬移质泥沙应满足沉降相似（或紊动扩散相似）、起动相似、挟沙力相似和冲淤变形相似条件，推移质泥沙应满足起动相似、输沙率相似和冲淤变形相似条件。

模型分类及模型沙　泥沙模型一般分为悬移质模型和推移质模型，也有采用悬移质和推移质同时模拟的全沙模型。泥沙模型水平比尺与垂直比尺相同时，为正态模型，水平比尺与垂直比尺不同时，为变态模型，两者之比称为变率。为了满足相似条件，模型沙的选择尤为重要，常用的模型沙有天然沙、煤屑、煤灰、轻质塑料沙（苯乙烯-二乙烯共聚体）、电木粉（酚醛塑料）以及经过沥青处理的木屑等。

由于泥沙运动的复杂性，严格地同时满足各种相似条件实际上是不可能的。从实用要求出发，在保证主要目标相似的前提下，允许其他相似指标有所偏离，但不超过一定范围。例如，以模拟冲刷为主的模型，淤积相似条件允许有所偏离；反之亦然。因此，在正式试验前要用已有资料对模型设计及选沙进行验证试验。

泥沙学科本身还不够成熟，模型试验成果主要依赖于验证资料的可靠性，也与试验人员的技术水平及经验有关。水流比尺和泥沙比尺不同而形成的时间差异，对大比尺模型是一项不容忽视的问题，应用泥沙试验成果时，应给予科学的判断。

在中国，泥沙模型试验是从 20 世纪 50 年代以后逐步发展起来的。钱宁等人在泥沙模型的理论和实践中做出了重要贡献。70 年代以后，为满足葛洲坝、小浪底、三峡工程等的要求，泥沙模型试验技术进一步得到发展（见图），已处于世界前列。



长江三峡工程泥沙模型试验

参考书目

钱宁．动床变态河工模型律．北京：中国科学出版社，1957.

屈孟浩．黄河动床模型试验理论和方法．郑州：黄河水利出版社，2005.

nisha qidong liusu

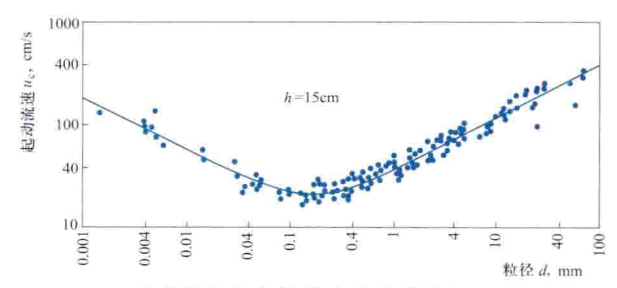
泥沙起动流速

（incipient velocity of sediment） 使河床上的泥沙颗粒脱离静止状态开始运动的临界水流速度。床面沙粒受到的作用力主要有水流的上举力和推移力，保持沙粒稳定的有沙粒的自重和沙粒之间的黏结力。当水流作用力超过重力和黏结力时，沙粒开始运动。沙粒的大小、形状和所处的位置不同，加上水流作用力具有脉动性质，沙粒起动存在随机性，缺乏严格的起动界线，造成众多起动流速公式有较大差异。对于非黏性的粗颗粒，重力是抗拒起动的主要力量。对于黏性细颗粒，黏结力是抗拒起动的主要力量。起动流速公式必须考虑两者的综合影响。下列张瑞瑾公式具有代表性

$$u_c=\frac{h}{d}^{0.14}\left(17.6\times\frac{\rho_s-\rho}{\rho}d+0.000\,000\,605\times\frac{10+h}{d^{0.72}}\right)^{1/2}$$

式中 u_c 为起动流速；h 为水深；d 为泥沙粒径；ρ_s、ρ 分别为泥沙和水的密度。

括号中的第一项反映重力的作用，第二项反映黏结力的作用。当粒径较大（$d>2$mm）时，括号中的第二项接近于零，起动流速随 d 的增大而增大。当 $d<0.02$mm 时，括号中的第一项可忽略不计，而随着 d 的减小，因黏结力的增加使 u_c 也增加。许多试验资料表明：在水深等于 0.15m 的情况下，最低的起动流速发生在粒径为 0.15～0.20mm，大于或小于此粒径的泥沙，起动流速都要增加。见图。



考虑颗粒间黏结性后所得到的起动流速与粒径间的关系

参考书目

武汉水利电力学院河流泥沙工程学教研室．河流泥沙工程学．北京：水利出版社，1981.

nisha shuxue moxing

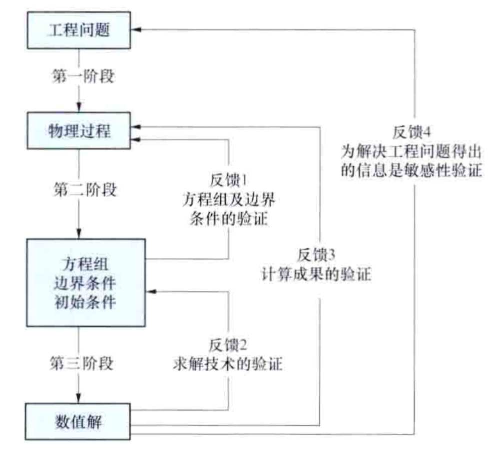
泥沙数学模型 （sediment mathematical model）

利用水流和泥沙运动规律建立起的代表河流系统的数学方程组，用以研究和预测河流系统在自然情况下和受人类影响后的水流泥沙运动和河床变化。

模型结构　泥沙运动及随之产生的河床变形是水流运动造成的，当河床出现变化后，又对水流造成一定的影响。因此，泥沙数学模型包括水流运动模型和泥沙运动模型两个子模型，前者模拟水流运动，后者模拟泥沙运动和河床变形。两个子模型应联立求解，即耦合解；当河床变形不很剧烈时，为了简化计算工作，可先后分别求解两个子模型，即非耦合解。泥沙数学模型多采用非耦合解。

模型分类　河流中水流及泥沙运动都是在三维空间中变化着的，要详细而准确地模拟它们，只有三维模型才可能做到。数学模型的发展是从简单到复杂，即从一维模型到三维模型逐步发展的。一维模型主要用于研究长时期、长河段的水流泥沙运动及河床变形，可以给出水流泥沙及河床的总体变化情况。对于需要了解河床局部变形的问题，就必须用二维模型才能解决。二维模型有平面二维模型和立面二维模型两种，前者不考虑各种因素在垂向的变化，后者则不考虑各种因素在横向的变化。前者较为常用。要根据问题的性质选用合适的模型，凡能用一维模型的问题就不必用二维模型。三维泥沙模型尚不成熟，实际工程运用很少。

研究方法　建立泥沙数学模型包括3个近似概化阶段及4个反馈过程。第一阶段是将工程问题表征成物理过程，第二阶段是用数学方程组表征该物理过程，第三阶段是方程组的数值求解。4个反馈过程是对各阶段的逐级验证，见图。



数学模型建立过程示意图

应用　在解决工程问题时，对所研究区域内各部分情况的了解可能会有详略不同的要求，针对这种情况可以有两种解决办法：一种是一维和二维模型相结合，在某些河段采用一维模型，在另外一些河段则采用二维模型；另一种办法是采用一个模型，而采用非均匀网格，在需要详细了解情况的部位加密网格，即嵌套模型。几乎所有泥沙数学模型方程组都不可能求得解析解，必须采用数值计算方法求近似解。数值计算的方法很多，采用最多的是有限差分法及各种积分法。在采用有限差分法时，根据问题的性质可采用显式方法或隐式方法。将数学方程进行数值离散时，必须使数值格式是稳定的、一致的和收敛的。20世纪50年代以来，由于计算机的应用，在水利水电工程领域诞生了一个新的分支学科——计算流体力学。在此基础上，70年代开始研制泥沙数学模型，至90年代以后发展迅速，已广泛运用到水利水电工程规划设计和运行中。但由于挟沙水流运动的复杂性，且模型中都含有经验或半经验公式和待定参数，存在地区的适用性，泥沙数学模型仍有待进一步研究、完善。在实际运用时一定要使用不同的实测资料对模型进行率定及验证。

nishiliu

泥石流 （debris flow; mud flow）

由大量细粒物质（粉砂、黏土）和巨大块石、漂砾等组成的间歇性洪流。泥石流分布地区广泛，主要由黏粒、粉粒及砂组成，仅少量碎石及岩屑，流体黏度大，多呈稠泥状，主要分布在黄土及火山灰地区的，称泥流；主要由块碎石块、砂组成，夹少量黏粒和粉粒，多发生在碳酸盐岩及火成岩地区的，称水石流。泥石流中固体物质含量有时超过水量，往往突然发生，持续时间很短，是山区常见的自然灾害，见图。泥石流爆发时，倾泻而下的泥石洪流具有巨大的破坏力，可摧毁沿途的房屋、道路、桥梁等建（构）筑物，淹埋农田、森林，堵塞江河，给国民经济和人民生命财产造成很大的灾害。



泥石流

泥石流区段划分　包括：①泥石流形成区。位于流域上游，多为高山环抱的山间盆地或洼地，是泥石流固体物质和水的主要供给地段。②泥石流流通区。位于泥石流沟的中游地段，多为狭窄河谷，地势陡峻，沟床纵坡大。③泥石流堆积区。位于泥石流沟口开阔地带，大小石块混杂堆积，多呈不规则扇形或锥形，地面垄岗起伏，坎坷不平。

泥石流形成条件　泥石流是在一定的地形、地质及气候条件下形成的：①地形条件。上游有较大的汇水面积，周围山坡及沟床纵坡较陡，有利于大量水流和泥石的迅速汇集和流动。②地质条件。汇水区内广泛分布松散堆积层，或山坡岩体强烈风化、破碎，或滑坡、崩塌等不良地质现象发育，为泥石流提供大量的固体物质。③气候条件。在泥石流中上游地区，有突发性暴雨或冰川积雪的强烈消融，为泥石流提供充沛的水源。

泥石流分类　按不同分类依据，有多种分类方法。按流域形态分为标准型泥石流、沟谷型泥石流及山坡型泥石流；

按流体性质分为黏性泥石流和稀性泥石流等。

泥石流治理　一般需采用综合的治理措施。在泥石流沟上游开展水土保持工作（平整山坡、植树造林、修建谷坊），以减少泥石流固体物质的补给来源；在泥石流沟内修建多道拦砂坝，以减缓沟床坡降和防止沟床下切而引起谷坡坍塌；在泥石流堆积区增强沟槽的排泄能力，修筑防护工程，尽量减少泥石流的危害。

nian fadianliang

年发电量　(annual energy output)　一年内水电站发电机发出的电量总和。一般指多年平均年发电量，即按设计采用的水文系列和装机容量，并计及水头预想出力限制计算的各年发电量的平均值。多年平均年发电量综合地表示水电站的能量效益，是水电站特征值指标之一。水电站的多年平均年发电量取决于河流的径流特性、水电站的利用水头、装机容量、调节性能（含上游水库的调节性能）、机组效率及系统运行特性。当水电站的建设方案确定以后，其多年平均年发电量主要取决于每年的来水及其分配以及水库运行方式。来水比较均匀或水库调节性能较好的水电站，每年的发电量差别较小，有利于电力系统的运行；年径流变化较大或调节性能较差的水电站，其枯水年与丰水年的发电量相差较大，影响水电站效益的发挥。

nian shushaliang

年输沙量　(annual sediment yield)　一年内通过河道某断面的输沙总量，以万 t 或亿 t 计。年输沙量包括悬移质泥沙和推移质泥沙两部分，它是水利水电工程规划设计中计算水库淤积及引水防沙设计的基础资料。

悬移质泥沙的年输沙量一般占年输沙量的 90%左右。年输沙量除以年水量为年平均含沙量，以 kg/m^3（或 g/m^3）计。一条河流的年输沙量及年平均含沙量与流域的面积、坡度、地表土壤、植被、年水量及暴雨强度有关。黄河中游山西、陕西两省分布大片黄土高原，土壤松散，植被稀少，暴雨强度大，因此黄河三门峡站多年平均悬移质年输沙量达 16 亿 t，多年平均含沙量 $37.5kg/m^3$，在世界大河中名列第一。中国南方河流长江、珠江及其支流多为土石山区，植被好，年平均含沙量一般小于 $1kg/m^3$。长江宜昌站多年平均悬移质年输沙量为 5.22 亿 t，相当黄河的 1/3；南方其他大河悬移质年输沙量皆小于 1 亿 t。世界及中国主要河流的年输沙量及含沙量见河流泥沙。

推移质泥沙一般为粗沙、砾石或卵石。推移质一般占年输沙量的比例较小，在平原地区河流占 1%～5%，丘陵地区河流占 5%～15%，山区河流占 15%～30%或更大。

输沙量年内分布很不均匀，主要集中在汛期（南方 5～9 月，北方 7～10 月），约占年输沙量的 90%，汛期几次洪水过程的输沙量可占年输沙量的 40%～50%。

输沙量年际变化也很大，主要与流域各年降水量及暴雨强度有关。一般河流丰沙年与枯沙年的年输沙量可差几倍甚至十几倍。工程设计中统计多年平均年输沙量，需要较长的实测泥沙系列资料，其中应包括丰、平、枯沙年。如果实测泥沙资料年限短（3～5 年），系列代表性不够，计算的多年平均年输沙量可能偏大或偏小。

niansuxing lixue

黏塑性力学　(visco-plastic mechanics)　研究固体材料与时间有关的力学性能的学科，是塑性力学的一个分支。固体材料的蠕变和应力松弛都是与黏性有关的力学现象。

具有塑性和黏性的物体称为黏塑性体。最早研究黏塑性体并给出简单力学模型（1919 年）的是美国的 E.C. 宾汉（E.C. Bingham，1878—1945），他给出了单向应力状态下黏塑性体的本构关系。随后，还有一些学者提出了各种反映应变率效应的本构关系。大量的实验表明，材料的屈服极限受应变率影响明显，这种材料称为应变率敏感材料，相应的动力屈服极限比静力屈服极限要高。在黏塑性理论的本构关系研究中，应考虑应变率效应。

对于黏塑性材料，屈服条件不仅同应力、塑性应变和强化性质有关，而且还同反映材料黏性的参数有关。

求解黏塑性力学中的准静力学问题与塑性力学中的问题相似，采用线性化的屈服函数和刚黏塑性模型，可以得到梁、圆板、球体等简单问题的解析解。但对于几何形状、支承条件和载荷情况比较复杂的结构，只能用数值计算方法寻求近似解。

nianyahunningtuba

碾压混凝土坝　(roller compacted concrete dam，RCC dam)　将干硬性的混凝土拌合料薄层摊铺并经振动碾压密实筑成的混凝土坝。碾压混凝土筑坝方法突破了传统混凝土大坝柱状浇筑的施工工艺，是对混凝土筑坝方法的一次重大改革。其主要优点有：①采用大仓面薄层连续浇筑、振动碾密实，坝体上升速度快，可缩短工期；②可掺用大量粉煤灰等掺合料，减少水泥用量，降低混凝土的绝热温升，简化温度控制措施，并降低混凝土单价，节约投资。其主要不足有：①由于碾压混凝土坝施工层面多且是结构的薄弱环节，处理要求高；②上游防渗需采取专门的措施；③坝身孔洞布置对碾压混凝土坝的施工及质量控制有一定影响。

按结构受力特点，碾压混凝土坝可分为碾压混凝土重力坝和碾压混凝土拱坝。为充分发挥碾压混凝土快速施工的优势，无论是重力坝还是拱坝，都应使采用碾压混凝土的部位相对集中，尽量扩大坝体采用碾压混凝土的范围，方便碾压混凝土施工。

坝体设计　碾压混凝土重力坝的工作条件和工作状态与常态混凝土重力坝基本相同，其主要设计原则、计算方法和基础处理等与常态混凝土重力坝基本相同，但应复核沿坝体碾压混凝土层（缝）面的抗滑稳定性。碾压混凝土拱坝多采用通仓浇筑，其分缝方式和建坝过程与常态混凝土拱坝有着明显的差别，混凝土浇筑过程即已形成拱形结构，施工期混凝土温度和自重对碾压混凝土拱坝应力及其分布的影响也与常态混凝土拱坝有着显著的差别，其应力状态比较复杂。除采用通常的拱梁分载法进行设计外，一般还需采用有限元法进行仿真计算，指导碾压混凝土拱坝的横缝或诱导缝的布置及设计。

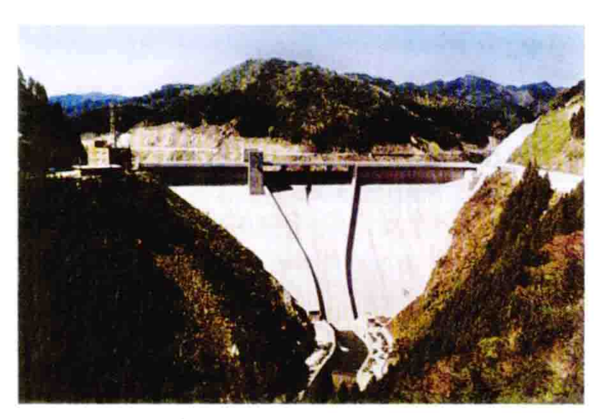
坝体构造　包括：①碾压混凝土坝坝体构造要力求简单，尽量减少坝身埋管和孔洞，少设或简化廊道布置。②碾压混凝土坝一般不设纵缝，碾压混凝土重力坝横缝或

诱导缝间距多为20～30m，碾压混凝土拱坝横缝或诱导缝间距一般通过仿真分析确定。横缝或诱导缝的设置要便于碾压混凝土施工，灌浆体系应具有重复灌浆的功能。横缝可由切缝机造缝或采用钻孔，预埋金属片、预制混凝土板等方法设置诱导缝。③碾压混凝土坝上游面应设防渗层，可采用二级配碾压混凝土、变态混凝土、常态混凝土、沥青材料、合成橡胶和复合土工膜等，其中广泛采用二级配碾压混凝土和变态混凝土作为主要防渗层。④碾压混凝土坝上、下游面，廊道等孔洞周围，两岸基础垫层，止水片，管道，钢筋布设区等部位采用变态混凝土，可解决异种混凝土之间的结合问题。

混凝土材料　碾压混凝土应满足强度、抗渗、抗冻、抗冲刷等耐久性要求和易于碾压的施工要求，碾压混凝土胶凝材料中掺合料（包括有活性的粉煤灰、火山灰、磷矿渣及铁矿渣等）所占的质量比，在外部碾压混凝土中一般不超过总胶凝材料的55%，在内部碾压混凝土中一般超过总胶凝材料的65%，总胶凝材料用量一般不低于130kg/m³。碾压混凝土抗压强度龄期一般采用180天（或90天）。

碾压混凝土施工　多采用自卸汽车、胶带机、负压溜槽（管）等或其组合方式运输碾压混凝土到仓面，当采用自卸汽车直接入仓时，应将轮胎冲洗干净。经平仓机平仓后，用振动碾密实，一般摊铺厚度为35cm，碾压厚度为30cm，有振碾压6～10遍，无振碾压1～2遍，一般经过现场试验确定。连续上升铺筑的碾压混凝土，层间间隔时间应控制在直接铺筑允许时间内，否则应在层面上先铺设砂浆或细骨料混凝土等垫层料，超过垫层铺筑允许时间的层面应按施工缝处理。碾压混凝土施工所用的模板除应满足强度、刚度和稳定性要求外，还需考虑振动碾压等荷载。

简史　碾压混凝土筑坝技术起源于20世纪70年代，80年代日本修建了岛地川（Shimajigawa）碾压混凝土重力坝（见图）；美国修建了柳溪（Willow Creek）碾压混凝土重力坝；1988年南非修建了奈尔波尔特（Knellpoort）碾压混凝土拱坝；2002年哥伦比亚的米埃尔Ⅰ（Miel Ⅰ）碾压混凝土重力坝，坝高188m。中国的碾压混凝土筑坝技术自20世纪70年代后期开始研究，1986年建成了福建坑口水电站碾压混凝土重力坝，坝高56.8m；1993年建成了贵州普定水电站碾压混凝土拱坝，坝高75m；2003年建成的四川沙牌水电站碾压混凝土拱坝，坝高132m。90年代中后期，岩滩、江垭、棉花滩、大花水、万家口子等一批百米级的高坝相继建设，碾压混凝土筑坝技术得到全面提升。坝高200m级的碾压混凝土筑坝技术取得了重大的突破，已建成了龙滩和光照两座坝高200m级的碾压混凝土重力坝，其中光照水电站坝高200.5m，为世界最高的碾压混凝土坝。



岛地川碾压混凝土重力坝

nianyahunningtuba shigong

碾压混凝土坝施工　(roller compacted concrete dam construction)　采用振动碾分层碾压干硬性混凝土筑坝的过程。碾压混凝土筑坝是对传统筑坝技术的一次重大变革，具有快速、经济、安全的特点。碾压混凝土坝施工的主要程序有导流与度汛、地基开挖与处理、砂石骨料与混凝土生产、现场碾压试验、垫层混凝土浇筑、碾压混凝土运输与入仓、仓面施工、温度控制、基础防渗与排水、施工质量控制等内容。

导流与度汛　与常态混凝土坝施工基本相同。

地基开挖与处理　与常态混凝土坝施工基本相同。

砂石加工与混凝土生产　碾压混凝土可采用天然骨料，也可采用人工骨料，人工骨料中砂的石粉含量一般为12%～22%，以利于提高碾压混凝土的可碾性、密实性、抗渗性、抗裂性和力学强度。砂石加工系统的布置及工艺与常态混凝土坝基本相同（见常态混凝土坝施工）。

碾压混凝土优先选用发热量较低的中、低热硅酸盐水泥，也可采用普通硅酸盐水泥等。胶材总用量不宜低于130kg/m³，其中掺合料一般占30%～70%。掺合料大都采用粉煤灰，当粉煤灰供应缺乏时，也有工程采用火山灰、粒化高炉矿渣粉、磷渣粉、凝灰岩和磷矿渣混磨双掺料、石灰岩和高炉矿渣混磨双掺料等作为掺合料。

由于碾压混凝土为干硬性混凝土，在碾压混凝土生产系统中，优先选用强制式拌和楼，也可使用自落式拌和楼或连续式搅拌机等。采用自落式拌和楼时，其拌和时间应适当延长，一般由120s延长到180s左右，为常态混凝土拌和时间的1.5倍。

碾压混凝土的工作度测试是生产碾压混凝土不可缺少的环节，也是与常态混凝土制备的主要差别。碾压混凝土拌合物工作度（VC值）应根据现场碾压试验确定，机口VC值根据施工现场的气候条件变化动态控制，一般在2～8s。

现场碾压试验　碾压混凝土坝施工前一般都要进行现场碾压试验，从中取得数据，用以指导碾压混凝土坝施工。主要试验内容包括：①论证和优选碾压混凝土配合比；②确定主要施工参数，如拌和楼的投料顺序及拌和时间、碾压层厚、VC值、碾压遍数等；③对模板安装、摊铺方法、坝体造缝工艺、有特殊要求部位的混凝土施工、喷雾降温等工艺进行试验，取得现场操作经验，制订施工工法；④对施工队伍进行有组织的培训。

垫层混凝土浇筑　为了使碾压混凝土坝与基岩结合紧密，在坝基开挖处理后，一般先浇筑一定厚度的常态混凝土或变态混凝土作垫层，也有工程采用在基岩面上直接铺筑小骨料混凝土或富砂浆混凝土找平后跟进浇筑碾压混凝土作为垫层，其厚度以找平后便于碾压作业为原则确定。

碾压混凝土运输与入仓　主要有自卸汽车直接运输入仓、皮带输送机入仓、负压溜槽（管）入仓、满管溜槽（管）入仓等方式，也可采用缆机、门机、塔机等设备入仓。在碾压

混凝土坝施工中，一般采用多种输送方式联合作业来解决碾压混凝土的运输和入仓问题，如中国普定水电站工程就采用自卸汽车、负压溜管及固定式缆机联合入仓方式，中国龙滩水电站工程采用皮带机、塔带机和负压溜槽联合入仓方式。

(1) 自卸汽车直接运输入仓是碾压混凝土坝施工采用较多的方法，适宜于场地开阔、道路修建方便的工程或部位，具有运输能力大、效率高、机动灵活、中途无须转料等优点。

(2) 皮带输送机入仓适宜于施工场地相对紧凑，仓面高差较大，不便修建公路的工程或部位。输送碾压混凝土既可采用土石坝施工所采用的普通皮带机，也可采用输送混凝土的专用皮带机，如深槽式皮带机、塔带机、胎带机等。皮带机上行时坡角以不超过15°为宜，下行时坡角最好控制在10°以内，运行速度一般控制在6m/s以内。皮带机输送碾压混凝土具有优质、高效的优点。负压溜槽（管）入仓适宜于河床狭窄、输送高差大、修建道路困难的工程和部位。

(3) 负压溜槽（管）一般沿坝肩成45°±3°斜坡布置，下部为半圆形钢槽，上部覆盖柔性胶带，根据输送强度设计管槽断面尺寸，当半圆形钢槽半径$R=20\sim35$cm时，运输强度可达200～360m³/h。负压溜管输送碾压混凝土时，利用混凝土与钢管、橡胶带的摩擦阻力和下滑时排走空气形成的负压，使碾压混凝土在管内被胶带裹挟成独立隆起的团状，呈波浪形下滑。仓内根据仓面大小配置不同数量的自卸汽车转料摊铺，具有输送能力强、输送高差大、质量高、安装拆卸方便、运行安全可靠等优点。中国在普定水电站工程（见图）首次运用后，迅速推广运用到中国的江垭、大朝山等水电工程，输送高差已达100m左右。



普定水电站碾压混凝土拱坝施工

(4) 满管溜槽（管）入仓是在负压溜槽的基础上发展改进而来的，适宜范围和布置形式基本同负压溜槽，满管溜槽出料口用弧形门控制，出多少、进多少，始终保持溜管充满料并连续输送，溜槽断面一般做成边长为60～80cm的矩形，运输强度可达300～500m³/h；缆机、斜坡道、塔机、门机等入仓方式基本同常态混凝土坝施工。

仓面施工　碾压混凝土仓面施工包括模板安装、摊铺平仓、碾压振实、造缝、层面处理、变态混凝土浇筑等作业内容。为满足碾压混凝土快速、连续上升的要求，模板一般采用大型悬臂模板、翻升式模板或自升式模板。入仓混凝土摊铺一般采用推土机（平仓机）进行薄层、水平摊铺平仓，平仓厚度控制在17～34cm。当浇筑能力不能满足大面积仓面施工要求时，也可采用斜层摊铺，斜层坡度不陡于1∶10。平仓后的碾压混凝土采用振动碾压实，碾压遍数一般为8～12遍，先无振碾压2遍，再有振碾压数遍，最后无振碾压1～2遍结束。坝体迎水面3～5m范围内，碾压方向应平行于坝轴线方向，以避免碾压条带接触不良而造成渗水通道。碾压混凝土坝一般不设纵缝，横缝可采用切缝机具切制、设置诱导孔或设置填缝材料等方法形成。切缝机切缝在平仓碾压前或碾压后，利用振动刀片将混凝土挤开，同时与刀片一起压入镀锌铁板或PVC等填缝材料；诱导孔成缝一般在间歇期间打孔，孔内填塞细沙形成；也有一些工程采用预埋分缝板、混凝土预制块等材料造缝。碾压混凝土连续上升时，层间间隔时间应控制在直接铺筑的允许时间之内，超过直接铺筑允许时间的层面可在层面上铺垫层拌合物，然后继续上升。超过了加垫层铺筑的时间后要按施工缝处理。为解决钢筋密集区、模板或廊道周边及振动碾无法达到部位的仓面施工问题，通常采用变态混凝土施工工艺。变态混凝土是在碾压混凝土摊铺施工中，通过掺入适当比例的水泥粉煤净浆等而形成的富浆碾压混凝土，可以用振捣的方法捣固密实，随碾压混凝土逐层进行。

温度控制　碾压混凝土虽然单位水泥用量少，产生的水化热不及常态混凝土，但由于碾压仓面大，上升速度快，坝体热量不易散发，内外温差所引起的胀缩不均仍将产生一定的温度应力，当温度应力超过碾压混凝土自身的抗裂（抗拉）强度时，将产生温度裂缝，有必要进行温度控制。一般采用预冷混凝土、碾压混凝土仓面埋设冷却水管进行通水冷却，其他温控措施见混凝土温度控制。

基础防渗与排水　碾压混凝土坝基础防渗主要为帷幕灌浆，并在帷幕下游侧设置排水孔。帷幕防渗和排水孔一般在预留的廊道内施工，帷幕灌浆施工工艺见灌浆。

质量控制　碾压混凝土质量控制包括原材料、拌合物的检测与控制，现场质量检测以及质量评定。除VC值和表观密度检测指标不同外，其他检测项目及内容与常态混凝土基本相同，见混凝土质量控制。在碾压混凝土坝质量控制指标中，表观密度检测指标是碾压混凝土最主要的指标之一，常采用核子水分密度仪在仓面施工时进行检测，一般要求碾压混凝土坝外部混凝土的相对密实度不小于98%，内部不小于97%。除了在搅拌机机口取样试验进行碾压混凝土质量评定外，还以钻孔取样作为碾压混凝土质量的综合评定方法。实践证明，碾压混凝土筑坝与常态混凝土筑坝在质量上无明显区别。

见常态混凝土坝施工。

nianya hunningtu shigong

碾压混凝土施工　(roller compacted concrete construction)　采用干硬性混凝土，用土石坝的施工设备运输及铺筑，振动碾分层压实，修建建筑物的施工技术。碾压混凝土施工的特点是：①可采用常规土石工程施工机械进行施工，如自卸汽车、推土机、振动碾等；②采用振动碾分层碾压；③采用通仓薄层施工，可连续上升；④由于水泥用量少、水化热低，温度控制措施较常规混凝土简单。与常规混凝土比较，碾压混凝土在降低工程造价、缩短工程施工工期等方面效益显著。

材料特性　碾压混凝土所用材料与常规混凝土相同，主要差别是配合比不同。为了适应振动碾碾压工艺，要求混凝土既要有一定的稠度，以承受振动碾的重量不陷车，同时还要有一定的塑性，以便拌和均匀，取得较好的碾压振实效果。在施工中用改良维勃仪测定混凝土的稠度。碾压混凝土的单位水泥用量较常态混凝土少。掺合料多数采用粉煤灰，也有的工程采用磷渣粉、火山灰等其他材料。

施工方法　碾压混凝土多采用通仓平层连续铺筑法，也可采用坡度不陡于1：10的斜向薄层铺筑法，单层压实厚度一般控制在300mm左右。仓内振动碾一般先无振碾压1～2遍，再有振碾压6～8遍；在大振动碾无法靠近的部位，常采用小型振动碾压实，压实遍数需适当增加。碾压混凝土拌合物工作度（VC值）是指在振动台上按照改良维勃（瑞典学者V. Bahrner）试验方法测定的混凝土表面泛浆时间，是碾压混凝土可碾性和层间结合的关键，一般控制现场仓面VC值在2～12s之间碾压混凝土对水比较敏感，当降雨量超过小雨等级时，宜停止作业。降雨强度等级采用中国气象标准，小雨等级为“小时总量1～3mm或一天内总量1～10mm，雨能使地面潮湿但不泥泞”。施工中降雨强度可按5～10min内现场测得的降雨量换算值进行控制。

质量控制　碾压混凝土质量控制包括原材料、拌合物的检测与控制，现场质量检测以及质量评定。除VC值、层间间隔时间和表观密度检测指标不同外，其他控制项目及内容与常规混凝土基本相同（见混凝土质量控制）。拌合物VC值选定后，机口VC值允许偏差为±3s；为保证层间结合良好，应严格控制层间间隔时间在直接铺筑的允许时间之内，否则需在层面加铺垫层拌合物或按照施工缝处理；压实后的表观密度是碾压混凝土现场控制的重点，建筑物外部的混凝土相对密实度不应小于98%，内部混凝土相对密实度不应低于97%。钻孔取样是评定碾压混凝土质量的综合方法，在混凝土达到设计龄期后进行，芯样直径一般为200mm。

发展概况　碾压混凝土早期用于修建公路路面及围堰工程。20世纪70年代第10届和第11届国际大坝会议提出了采用碾压混凝土建造重力坝的建议。1974～1979年，在巴基斯坦塔贝拉（Tarbela）坝修复工程中大量使用碾压混凝土（230万m^3）。1978～1980年，日本将碾压混凝土用于高89m的岛地川重力坝内部混凝土（20万m^3）和高78m的大川坝的基础混凝土（30万m^3），开始进入正式筑坝阶段。中国于1979年开始研究碾压混凝土，1986年在福建坑口建成了高56.8m的碾压混凝土重力坝。1999年，中国的碾压混凝土开始蓬勃发展，多个百米级碾压混凝土坝开工建设，逐步形成了具有中国特色的碾压混凝土筑坝技术。龙滩大坝施工创造了月浇筑碾压混凝土38万m^3的纪录，在2005年6～8月的高温多雨环境下，浇筑碾压混凝土48万m^3，实现了碾压混凝土高温季节大规模连续施工。三峡水利枢纽三期碾压混凝土围堰，4个月完成碾压混凝土120万m^3、填筑高度100m，在同规模工程中其上升速度最快。

nongcun yimin anzhi

农村移民安置

农村移民安置　（rural resettlement）　为建设征地范围内的农村移民提供满足生存和发展需要的土地等生产资料、居住场所，为安置移民解决水、电、路、医、学等配套基础设施，帮助其在安置区生存、发展的全过程。农村移民安置的主要内容包括计算农村移民安置人口，分析移民安置环境容量，选择移民生产安置方式和搬迁安置方式，制订移民安置方案，预测评价移民生活水平等。

农村移民安置人口　因工程建设征地需恢复生产或生活条件的农村人口，分为生产安置人口和搬迁安置人口两类。

生产安置人口　水电工程土地征收线内因原有土地资源丧失，或其他原因造成土地征收线外原有土地资源不能使用，需重新配置土地资源或解决生存出路的农村移民人口。生产安置人口应以其主要农业收入来源受建设征地影响的程度为基础研究确定，必要时还需考虑征地处理范围内与征地处理范围外土地质量级差因素的影响。以耕地为主要农业收入来源者，生产安置人口按照被征收的耕地数量除以被征地单位平均每人占有耕地的数量计算。对生产安置人口中的劳动力需要进行就业规划，并结合产业规划的调整进行就业培训。

搬迁安置人口　水电工程居民迁移线内因原有居住房屋拆迁，或居民迁移线外因生产安置或其他原因造成原有房屋不方便居住，需重新建房或解决居住条件的农村移民安置人口。

移民安置环境容量　根据拟定的分析范围和时期，选用合适的分析方法，按照移民生产安置规划目标和安置标准，通过对该区域自然资源的综合开发利用后，对不同类型生产安置方式确定的可接纳生产安置人口的数量。

分析范围　按照在农村集体经济组织、本村、本乡（镇）、本县（市、区）、本省（自治区、直辖市）的顺序进行，优先选择建设征地涉及的乡（镇）；当本乡（镇）内资源不足以安置全部移民时，扩大在本县（市、区）的邻近乡（镇）范围；当本县（市、区）范围内无法全部安置时，可考虑扩大到外县（市、区）范围，以此类推。

分析方法　采取定性和定量相结合、由近及远的方法进行分析，在本行政区内无法安置的，应由上级人民政府协调落实外迁安置范围。定性分析初选安置区和安置方式的适宜性，主要考虑自然资源和社会环境等因素，如土地资源、气候条件、移民和安置区居民意愿、经济发展水平、生产关系、生产生活习惯、基础设施条件、生产水平、宗教信仰和民族习俗等；定量分析应考虑资源、经济、人口等指标的动态变化和对移民安置涉及区域资源和经济的影响程度，并据此确定初选的安置区和安置方式可能安置移民的数量，分析确定影响移民安置的主要因素和敏感因素，建立评价指标体系进行综合的分析预测，确定可能安置移民的容量值。常用的移民安置环境容量定量分析方法有综合指数法、最小值法、O&I法（目标与影响法）。

类型　结合安置移民的资源条件可分为农业移民安置环境容量、第二产业移民安置环境容量、第三产业移民安置环境容量、其他方式移民安置环境容量等类型。

移民生产安置方式　为生产安置人口配置土地资源或解决生存出路而采取的途径和方法。按照移民获得生产资料的类别，生产安置方式可分为：农业安置方式，第二、三产业安置方式，其他生产安置方式。

农业安置方式　以土为本，主要或部分依赖土地资源对移民进行安置的生产安置方式，主要包括开发土地安置、调整土地安置、复合安置（配置部分土地，结合第二产业和第三产业安置）。

第二、三产业安置方式　移民迁入城镇或农村商品经济较发达的区域，带资进厂、自办企业，或者从事商业、服务业等第二、三产业解决生存和发展问题的生产安置方式。

其他生产安置方式　包括社会保障、投亲靠友、自谋职业、一次性补偿、逐年补偿等安置方式。社会保障安置是指不需要配置土地资源，定期给移民发放社会保障金的安置方式。投亲靠友安置是指移民户在征地区外有亲友，并能利用生产安置费在亲友所在地解决生产出路的安置方式。自谋职业安置是指移民户中有特长、已脱离或可以脱离土地资源自谋生产出路的安置方式。一次性补偿安置是指不需配置土地资源，一次性将生产安置费直接支付给移民的安置方式。逐年补偿安置是指对建设征地中的耕园地，将其产出效益逐年发放给相应移民的安置方式。逐年补偿安置中，一种做法是将征收耕园地的产出按确定的粮食产量和省粮食主管部门公布的粮食保护价格折算为现金，以货币形式逐年发放给被征地的移民，该方式已在广西长洲、湖南托口、贵州三板溪等部分水电工程实行；另一种做法是根据"淹多少、补多少"的原则，以被淹法定承包耕地前三年的谷物平均产量为基础，依据所对应年份省粮食主管部门公布的粮食交易价格确定耕地平均亩产值，按照中华人民共和国国务院令第471号文件《大中型水利水电工程建设征地补偿和移民安置条例》规定的土地补偿补助标准，以货币形式对被征地的移民实现逐年补偿，该方式已在云南省金沙江中游部分的水电工程实行；还有一种做法是对生产安置的移民按确定的每人每月领取标准实行逐年补偿，其耕园地的土地补偿费和安置补助费统筹用于逐年补偿，该方式已在金沙江下游部分水电工程的云南区域实行。

搬迁安置方式　为搬迁安置人口重新建房或解决居住条件而采取的途径和方法，见图。按搬迁距离和行政隶属关系，分为就近（后靠）安置、远迁安置、外迁安置；按移民搬迁的集中与分散程度，分为集中安置、分散安置、城镇安置。搬迁安置方式宜根据移民生产安置方案和安置区建设条件、基础设施现状，结合安置标准等情况综合选择。



奉节移民新村

就近（后靠）安置　在本村建房安置，利用库周剩余资源且耕作距离不大于设计耕作半径。

远迁安置　移民在本县（市、区）外乡（镇）建房安置，或在本村建房安置但距其原有耕地等生产资料的距离大于设计耕作半径。

外迁安置　移民迁至外县（市、区）或外省（自治区、直辖市）建房安置。

集中安置　集中建立移民居民点和居住点，统一布局的搬迁安置方式，一般指移民人数在100人以上的农村居民点。

分散安置　布局松散、分散建房的搬迁安置方式，一般指移民人数在100人以下的居民点。

城镇安置　随城镇搬迁，或由农村迁入城镇内建房安置的搬迁安置方式。

农村移民安置方案　根据国家及省级人民政府出台的移民安置政策，以及安置区实际情况，结合环境容量分析成果，分析研究影响移民安置方式、去向和资源配置等的主导因素，综合分析确定移民生产安置方案和搬迁安置方案。在此基础上，开展生产安置和搬迁安置规划设计。

生产安置方案　依据拟定的生产安置方式、标准等，结合安置区实际情况和环境容量分析成果，合理确定生产资料来源、方式、数量、措施及投资等。

搬迁安置方案　结合移民生产安置方案，本着有利生产、方便生活、节约用地、确保安全的原则，分析确定搬迁地点，搬迁安置人口规模，基础设施配置的项目及规模、投资等。

生产安置规划设计　对农村移民生产安置项目和相应配套的基础设施工程进行规划设计。移民生产安置包括农业安置，第二、三产业安置和其他途径安置等，配套基础设施包括农田水利设施、道路工程等。

搬迁安置规划设计　对移民居民点新址进行选择，开展移民居民点规划和配套基础设施工程设计等工作。移民居民点的规划设计包括居民点建设用地范围内的用地布局、道路、基础设施工程、公共建筑、环保、防灾等规划设计，基础设施工程规划设计包括居民点内的供水、排水、供电、电信、广播电视、环保、防灾等生产、生活服务设施的配置标准及规划设计。

移民安置生活水平评价预测　以集体经济组织为单元，根据地方有关统计资料和移民区、移民安置区具体情况，选用合适的评价预测指标，对移民生活现状进行分析和评价；对移民安置规划确定的资源配置情况、生产条件、生活条件进行分析，对规划水平年安置效果进行预测。

移民生活水平评价预测指标与制定的移民安置标准相对应，包含生产指标、生活环境和居住环境3类。生产指标包括移民的人均耕地、人均粮食、人均纯收入等；生活和居住环境指标包括人均建设用地面积、人均生活用电标准、人均生活用水标准，居民点交通条件，居民点的自然和社会环境（居民点的绿化率、就学条件、医疗条件、广播电视条件）等。

Nulieke Shuidianzhan

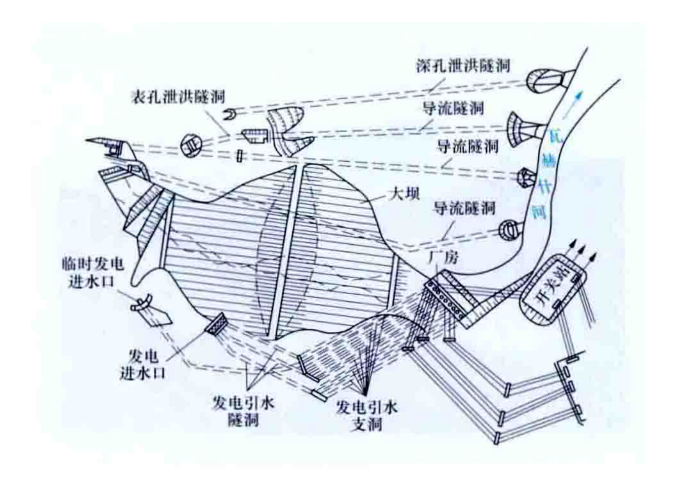
努列克水电站

(Nurek Hydropower Station)　位于塔吉克斯坦共和国境内瓦赫什河中游的普列刹峡谷处，工程具有发电、灌溉和航运等综合效益。电站装机容量2700MW，多年平均年发电量112亿kW·h。

水文和水库特性　坝址控制流域面积3.07万km^2，多

年平均径流量205亿m^3，最大流量为3730m^3/s。水库面积98km^2，总库容105亿m^3，有效库容45亿m^3。

枢纽布置　枢纽工程由大坝、泄水建筑物、厂房等组成，见图。



努列克水电站枢纽平面布置图

大坝　砾石土心墙土石坝，最大坝高300m，坝顶长744m，坝顶宽20m，坝基宽1440m，上、下游坝坡坡度分别为1∶2.25和1∶2.20。坝址位于强震区，地震烈度Ⅸ度。坝壳上部采取了加筋等抗震措施。坝体方量5800万m^3，其中防渗心墙780万m^3，过渡区和反滤层340万m^3，上、下游棱体3630万m^3，上、下游干砌护坡850万m^3。心墙下为混凝土垫座，最大厚度23m，长157m。垫座表面覆盖两层玻璃纤维加强的聚合薄膜，垫座内还布置有4.2m×3.8m廊道，供灌浆和检查用。心墙与坝壳间设反滤层，上游侧坝顶至正常蓄水位高程为双反滤层，下部为单反滤层；下游侧为双反滤层。考虑坝址位于强震区，为此采用了坝壳上部加筋等抗震措施。

泄水建筑物　包括1条深孔泄洪洞和1条表孔泄洪洞。深孔泄洪洞进水口底坎高程810.00m，位于正常蓄水位以下100m处。深孔泄洪隧洞设有深120m的检修闸门竖井，并在2个地下闸室内分别安装有3.5m×9m履带式平板事故检修闸门和5m×6m弧形工作闸门各2扇。闸门设计水头为120m和110m。泄洪洞全长1326m，洞身为10m×10.5m的城门洞形。工作闸门前为有压段，门后为无压段，最大流速达到40m/s，泄量2400m^3/s。尾部接开敞式溢洪道，末端有挑流鼻坎，宽度由10m扩大至鼻坎处的29m。溢流面上设有8道掺气槽，槽深和槽宽均为140cm，挑坎高10cm。表孔泄洪隧洞进口堰顶高程904m，用斜洞与第三层导流隧洞连接，即将该导流洞尾段用作泄洪隧洞水平段，断面尺寸为11.5m×10m，进口设有2扇12m×12m弧形闸门，泄量为2000m^3/s。

厂房　厂房为半露天式结构，长200m，高40m。包括1个临时发电进水口和3个永久进水口，1条临时、3条永久的引水隧洞，每条永久引水隧洞连接3条直径为6m的压力钢管。厂房内安装9台单机容量为300MW的混流式水轮发电机组。输出电压为500kV和220kV，送往中亚统一电网。

工程施工　施工导流共设有3条导流隧洞，分3层布置，其进口底坎高程分别为650.00、670.00、740.00m，长度分别为1630、1600、1352m。隧洞断面为城门洞形，尺寸分别为10m×11.5m、10m×11.5m～10m×10.1m、10m×11.1m～10m×10m。

工程于1961年开工兴建，1972年开始发电，1980年建成。

Nu Jiang shuixi shuineng ziyuan

怒江水系水能资源

（hydropower resources of Nujiang River System）　据《中华人民共和国水力资源复查成果（2003年）》统计，中国境内怒江水系水能资源理论蕴藏量为3919.39亿kW·h/a，占中国水能资源的6.44%；其中技术可开发资源1625.77亿kW·h/a，占中国水能资源的6.57%。怒江呈条带状，支流较短小，干流长且落差大，水能资源主要集中在干流。

怒江发源于西藏自治区北部唐古拉山南麓安多县境内，上源称桑曲，出喀隆湖后称那曲，左岸支流素曲汇入后始称怒江。该江在西藏境内先大体向东流，之后改为南偏东流向，在察瓦龙附近进入云南后大体向南流，干流经云南西部在德宏州潞西县流出国境进入缅甸，上缅甸称查黑江，下缅甸称滚龙江，在缅甸总称萨尔温江，最后注入印度洋的安达曼海。

怒江水能资源主要集中在干流，支流较少。干流技术可开发装机容量30 391.4MW，多年平均年发电量1524.83亿kW·h，分别占本水系技术可开发量的94.3%和93.8%。支流技术可开发装机容量1819.9MW，多年平均年发电量100.94亿kW·h，分别占本水系技术可开发量的5.7%和6.2%。

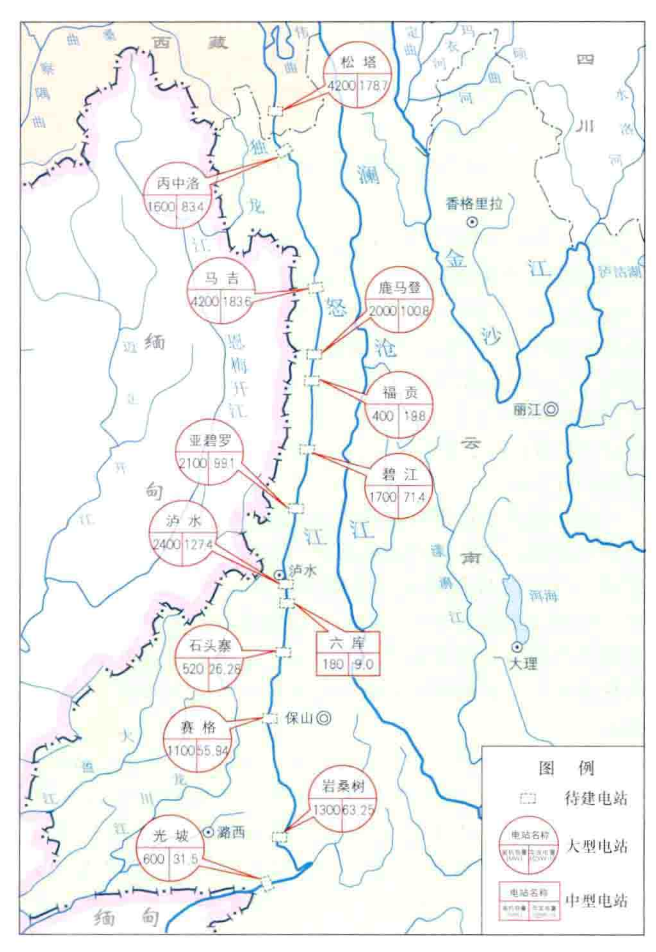
怒江水能资源以大型水电居多。大型水电站装机容量共29 610MW，多年平均年发电量1486.59亿kW·h，分别占技术可开发量的91.9%和91.4%。大型水电站中装机容量1000MW以上水电站装机容量共23 390MW，多年平均年发电量1151.42亿kW·h，占技术可开发电量的72.6%和70.8%。最大水电站为马吉水电站，规划装机容量4200MW，多年平均年发电量189.66亿kW·h。中小型水电站装机容量共2601.3MW，多年平均年发电量139.2亿kW·h，分别占技术可开发总量的8.1%和8.6%。

怒江水能资源技术可开发量中，云南省境内电站装机容量共17 988.1MW，多年平均年发电量900.46亿kW·h，分别占本水系技术可开发量的55.8%和55.4%；西藏自治区境内电站装机容量共14 223.1MW，多年平均年发电量725.32亿kW·h，分别占本水系技术可开发量的44.2%和44.6%。

Nu Jiang zhong-xiayou shuidian guihua

怒江中下游水电规划

（hydropower development planning of the middle and lower reaches of Nujiang River）　根据中国国家发展和改革委员会安排，2003年编制完成了《怒江干流中下游水电规划报告》。怒江中下游干流规划推荐2库13级开发方案，即松塔、丙中洛、马吉、鹿马登、福贡、碧江、亚碧罗、泸水、六库、石头寨、赛格、岩桑树和光坡水电站，见怒江中下游河段梯级开发方案图。其中松塔和马吉为龙头调节水库，具有年调节能力，规



怒江中下游河段梯级水电站布置图及开发现状

划 13 级总装机容量 21 320MW，多年平均年发电量 1029.6 亿 kW·h。2004 年 11 月，中国国家发展和改革委员会和国家环保部对《怒江中下游水电规划环境影响报告书》进行了联合审查，提出建议，近期开发马吉、亚碧罗、六库、赛格“一库四级”方案，规划装机容量 7580MW，多年平均年发电量 341.5 亿 kW·h。

在中国境内，怒江干流河道长约 2020km，落差约 4840m，流域面积约 12.55 万 km²。其中，在西藏境内河道长 1401km，落差 3717m、流域面积 10.36 万 km²，在云南境内河道长 620km、落差 1123m，流域面积 2.19 万 km²。怒江中游（藏滇交界至云南六库）河段长约 310km，落差约 856m。为寻找库容较大的水库，规划河段向西藏境内延伸 126km，即实际规划河段长为 436km，落差为 1314m，怒江下游（云南六库至中缅边境）河段长约 310km，落差 267m，考虑到中游河段已建调节水库，为减少水库淹没，只宜建低坝径流式水电站。

由于有关各方对怒江干流开发有争议，干流未能启动大中型水电站的建设。在干流上游和支流建设了一些小型水电站，以满足当地经济发展和居民用电要求。

Nuozhadu Shuidianzhan

糯扎渡水电站 (Nuozhadu Hydropower Station)

位于中国澜沧江下游云南省普洱市境内，距昆明市直线距离 350km。开发任务以发电为主，同时可提高下游景洪市的防洪标准，见图 1。装机容量为 5850MW，多年平均年发电量 239 亿 kW·h。电站出 4 回 500kV 输电线路接入倚象坝开关站，分别向广东、云南送电。



图 1 糯扎渡水电站

水文和水库特性 挡水、泄水建筑物设计洪水标准为 1000 年一遇，洪峰流量 27 500m³/s，校核洪水标准为可能最大洪水，洪峰流量 39 500m³/s。水库总库容 237 亿 m³；水库正常蓄水位 812.00m，相应库容 217 亿 m³；死水位 765.00m，调节库容 113 亿 m³。水库具有多年调节性能。

枢纽布置 枢纽工程由大坝、泄水建筑物、引水发电系统等组成，见图 2。

大坝 岩基上的土质心墙堆石坝，坝顶高程 821.50m，最大坝高 261.5m。坝体基本剖面为中央直立心墙形式，心墙土料为人工掺碎石砾质土，坝顶宽 18m，上游坝坡坡度为 1∶1.9，下游坝坡坡度为 1∶1.8，坝体填筑方量 3400 万 m³，其中心墙防渗料 464 万 m³。

泄水建筑物 开敞式溢洪道布置在左岸，宽 151.5m，进口底板高程 775.00m，堰顶高程 792.00m，共设 8 个尺寸为 15m×20m（宽×高）的表孔，最大泄流量 32 533m³/s，采用挑流并预挖消力塘消能。左岸泄洪隧洞进口底板高程为 721.00m，全长 950m。有压段断面为内径 12m 的圆形，工

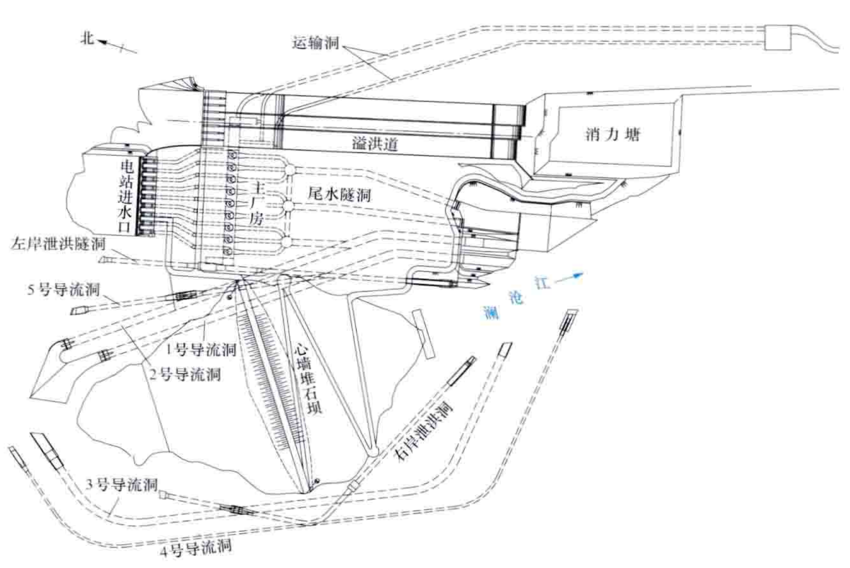


图 2 糯扎渡水电站枢纽平面布置图

作闸门为2孔，孔口尺寸为5m×9m（宽×高），最大泄流量3395m^3/s。无压段断面为城门洞形，其后段与5号导流隧洞结合，出口采用挑流消能。右岸泄洪隧洞进口底板高程为695.00m，全长1062m。有压段断面为内径12m的圆形，工作闸门为2孔，孔口尺寸为5m×8.5m，最大泄流量3257m^3/s。无压段断面为城门洞形，高12m，宽18.28～21.5m，出口采用挑流消能。

引水发电系统　位于左岸，电站采用塔式进水口，长225m，宽35.2m，最大高度88.5m。利用检修拦污栅槽设置叠梁门进行分层取水。引水洞采用单机单洞，布置9条引水洞，单机引用流量393m^3/s，引水洞直径为8.8～9.2m。地下厂房总长418m，顶拱跨度31m，高度81.6m，共布置9台单机容量为650MW的发电机组。主变压器室布置于地下主、副厂房下游，两洞室净距45.75m。主变压器室总长348m、跨度19m，内设主变压器层、电缆层及GIS层。地面副厂房、500kV出线场等布置在主厂房顶821.50m地面平台上。尾水系统采用三机一室一洞布置方式，阻抗式尾水调压室的结构形式为圆筒式。1号调压室尺寸（直径×高）为27.8m×92m，2、3号调压室尺寸（直径×高）为29.8m×92m，间距为102m。3个调压井后接3条尾水隧洞，洞径为18m，其中1号尾水隧洞与2号导流隧洞相结合。

水轮机采用混流式，单机容量650MW，额定出力663.3MW，转轮直径7.2m，额定转速125r/min，吸出高度－10.4m。发电机为半伞式结构，冷却方式采用全空冷，额定容量722.22MV·A，额定功率650MW，额定电压18kV，额定功率因数0.9，额定转速125r/min。

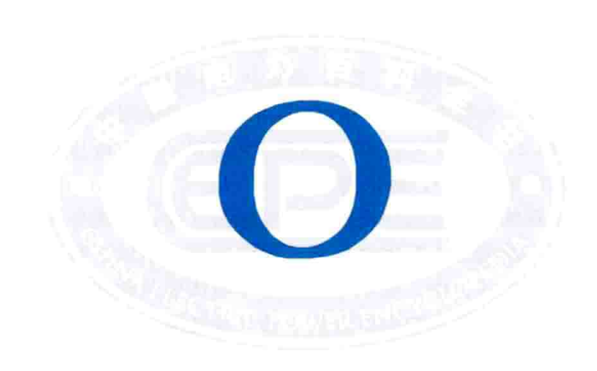
工程施工　工程导流建筑物级别为3级，初期导流采用河床一次断流、土石围堰挡水、隧洞导流、主体工程全年施工的导流方式；中、后期导流均采用坝体临时断面挡水，中期的泄水建筑物为初期所设的5条导流隧洞；导流隧洞下闸封堵后，利用右岸泄洪洞和溢洪道临时断面泄流。

工程于2004年4月开始筹建，2006年1月导流洞主洞开工建设，2007年11月4日截流，2011年11月下闸蓄水，2012年9月首台机组投产发电，预计2014年6月完工。

主要工程量：土石方明挖4826万m^3，石方洞挖576万m^3，土石方填筑3381万m^3，混凝土浇筑429万m^3，金属结构及机电设备安装13.90万t。

设计单位　中国水电顾问集团昆明勘测设计研究院。

建设单位　华能澜沧江水电有限公司。



Ou Zhou shuineng ziyuan

欧洲水能资源 (hydropower resources of Europe)
根据英国《国际水电与大坝》杂志2011年发布的《World Atlas》统计，欧洲（不包括俄罗斯和土耳其）水能资源理论蕴藏量28 299亿kW·h/a，技术可开发量10 384亿kW·h/a，经济可开发量7797亿kW·h/a。

除俄罗斯外，欧洲面积596万km^2。欧洲绝大部分地区气候湿润，靠近大西洋向风坡地区年降水量在1000mm以上，广大的低山、丘陵、高原地区降水量在500～1000mm之间。欧洲北部斯堪的纳维亚山脉和南部的阿尔卑斯山脉的海拔较高，海拔200m以下的平原约占全洲的60%。全洲平均海拔300m，是平均海拔最低的洲。欧洲河流分布很均匀，多短小而径流充沛的河流，主要有多瑙河、莱茵河、罗讷河、杜罗河、律勒河等。基于以上地形和降水条件，欧洲以挪威、瑞典、法国、意大利、瑞士和冰岛等国水能资源较丰富。

欧洲水能资源开发较早，开发程度亦较高，技术可开发资源开发率约54%，是各大洲中最高的，其中瑞士开发程度达到92%，意大利达到86%。一些水能资源丰富的国家水电在电力工业中所占比重较大。据英国《国际水电与大坝》杂志2010年发布的《World Atlas》，2010年水电发电量超过总发电量50%的国家有挪威、奥地利、瑞士等国，其中挪威2010高达95%。

欧洲各国在水能资源开发过程中注意在山区支流建调节性能好的水库、高水头水电站，而在平原河流建径流式水电站，两类水电站互相配合运行。在多瑙河、莱茵河、罗讷河等都结合航运建设梯级水电站。



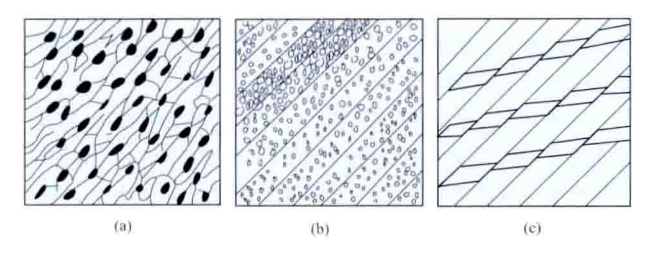
pili

劈理 (cleavage) 在构造应力作用下，岩石沿一定方向劈开的大致平行排列的密集（间距在几厘米以下）的细微破裂面。是比节理更次一级的构造面。劈理的发育多见于受构造变动强烈的褶皱和断层带附近及某些变质岩中。劈理按其力学成因可分为流劈理、破劈理及滑劈理。

流劈理 压应力作用下塑性变形的流变构造，矿物颗粒沿垂直压应力方向平行排列，见图（a），沿劈理面易于裂开，主要发育在泥质软弱岩中，如板岩中的板状劈理。

破劈理 剪切应力作用造成的断裂构造，呈间距几毫米至几厘米的密集剪裂隙，裂面间矿物颗粒无定向排列，见图（b），多发育在脆性岩石。

滑劈理 介于流劈理和破劈理的过渡类型，是切过流劈理的一组差异性平行滑动面，附近矿物呈平行排列，在两劈理面中间则无定向，见图（c），多见于细粒层状泥岩，有微小位移。



劈理面附近矿物分布特征

（a）流劈理；（b）破劈理；（c）滑劈理

劈理可以反映大型构造变形环境。在岩性均一、韧性高的褶皱核部，易发育大致平行于褶皱轴面的劈理。在断层破碎带或影响带中发育的劈理，常与断层面相交成锐角，其尖端指示断层对盘错动的方向，在野外可用以识别断层性质。

piancha xishu

偏差系数 (coefficient of deviation) 表示变量概率分布对称性和分布方向的相对指标。又称偏态系数。偏差系数用符号 C_s 表示，其计算公式为

$$C_s = \frac{1}{C_v^3 \overline{x}^3}\left[\int_{-\infty}^{\infty}(x-\overline{x})^3 f_x(x)\mathrm{d}x\right]$$

式中 $\overline{x}$ 为均值；$f_x(x)$ 为概率密度函数；C_v 为离差系数。$C_s>0$ 表示大于均值的各项值占优势，称为正偏；$C_s<0$ 表示小于均值的各项占优势，称为负偏；$C_s=0$ 表示大于和小于均值的各值都不偏，称为对称。上述 3 种情况对概率密度曲线和概率分布曲线的影响见图 1 和图 2。

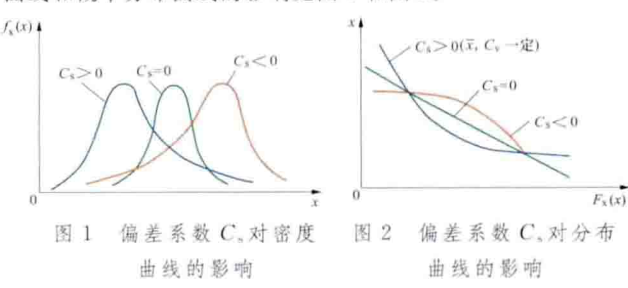


图 1 偏差系数 C_s 对密度曲线的影响　　图 2 偏差系数 C_s 对分布曲线的影响

中国水文变量 C_s/C_v 的取值范围，年径流在 2.0 左右，洪水为 2.5～6.0，暴雨在 3.5 左右。

pianli

片理 (schistosity) 岩石由于发生深度的重结晶作用和变质结晶作用，改变了原岩层理的面貌，使片状矿物和柱状矿物（如云母、绿泥石、角闪石等）大量集中并定向排列而形成的一种面状构造。片理是变质岩中常见的一种小型构造面，其成因类型属于变质结构面。

分布密集的片理，对坝基、边坡、地下洞室稳定有一定影响，在一定条件下构成控制性结构面。如在变质岩中所夹的薄层云母片岩、绿泥石片岩及滑石片岩等，岩性软弱，片理发育，易揉曲、破碎、风化和泥化，往往构成软弱岩带。如陕西安康水电站，坝基岩性为震旦系千枚岩，由于结构面揉曲，两岸产生倾倒变形及在施工期发生 10 多处坍塌。又如四川锦屏二级水电站引水发电隧洞，在大理岩中局部夹有一定厚度绿泥石片岩，产状陡立，强度较低，遇水软化，开挖后围岩变形大，产生“缩径”现象，加厚衬砌后为防止其进一步软化，又需进行高压固结灌浆处理。

在水电工程勘察中，重点要查明片岩中片理的发育程度、空间分布、矿物成分、力学性状等地质特征。

pingmian kongzhi celiang

平面控制测量 (plane control survey) 为求得地面点的平面位置而建立的三角形、导线、全球导航卫星系统（global navigation satellite system，GNSS）和图根（点）网的测量工作的总称。地面点的平面位置通常采用某种投影建立的平面直角坐标系表示，以南北方向的纵轴为 X 轴，东西方向的横轴为 Y 轴，方位角从正北顺时针方向起算。

平面控制网的布设 为了控制全局和限制各种测量误差的积累，平面控制网的布设原则为从整体到局部、由高级到低级、分级布设、逐级控制。中国国家大地控制分一、二、三、四 4 个等级，工程测量控制网中增加五等平面控制等级。水电工程测量的平面控制分基本平面控制、图根平面控制和测站点平面控制。基本平面控制划分为二、三、四、五等；图根平面控制可根据需要以同等精度发展一、二次，分别为图根一级、图根二级；测站点平面控制可用解析法或图解法测定。此外，为了满足工程高精度的控制要求，可建立专用平面控制网。专用平面控制网分为专一、专二、专三、专四 4 个等级。规划设计阶段的测量范围较大，一般与国家等级（点）网联测，若因地区条件限制，可以布设独立网，采用独立坐标系统。对水工建筑物的枢纽区平面控制布设，

应考虑以后大比例尺测图的需要，宜布设较高精度基本平面控制。

测量方法 包括三角形网测量、导线网测量和GNSS网测量。

三角形网测量 在地面上选定一系列点构成连续三角形(单三角、大地四边形、中点多边形等)，通过全部或部分测定三角形顶点的水平角、三角形的边长和起始方位角，再根据起始点坐标来推求三角形顶点坐标的测量方法。三角形网测量是传统的三角测量、三边测量和边角测量的总称，是中国传统国家平面大地控制网、工程控制网和工程施工控制网、变形监测基准网的主要测量方法。

导线网测量 将一系列点依相邻次序连成折线形式，依次测定各折线边的长度、转折角（或同时测定天顶距），再根据起始数据推求各点水平位置（或同时推求高程）的测量方法。导线测量具有作业迅速、精度高（边长采用电磁波测距）、受地形限制小等优点，是测图平面控制网的主要测量方法。导线测量按精度分为精密导线测量和普通导线测量，按布设形式分为支导线、无定向导线、附合导线、闭合导线、导线网等几种类型。

GNSS网测量 通过测量安置在控制网点上的用户GNSS接收机到已知位置的多颗全球导航卫星系统卫星之间的距离，综合多颗卫星的数据计算控制点具体位置的测量方法。全球导航卫星系统（GNSS）是以卫星为基础的无线电导航定位系统，具有全能性、全球性、全天候、连续性和实时性作业的特点，同时具备测站间无须通视、观测时间短、定位精度高的优点，还可提供全球统一的三维地心坐标，已成为建立全球IGS观测网、中国国家大地控制网、区域性大地控制网、工程控制网的主要技术手段。GNSS控制网分为A、B、C、D、E 5个等级。GNSS建立控制网的方法包括精密单点定位（PPP，又称绝对定位）和相对定位两类，GNSS相对定位是建立控制网的主要方法，精密单点定位技术是新发展起来的GNSS技术。GNSS控制网按图形形式分为三角形网、多边形网、附合导线网和星形网，按连接方式分为点连式、边连式、网连式和边点混合连接4种。

参考书目

李征航，黄劲松. GPS测量与数据处理. 武汉：武汉大学出版社，2005.

孔祥元，郭际明. 控制测量学. 武汉：武汉大学出版社，2006.

张小红. 机载激光雷达测量技术理论与方法. 武汉：武汉大学出版社，2007.

pingmian zhamen

平面闸门 (plane gate) 挡水面板为平面的闸门。可用作工作闸门、事故闸门和检修闸门，是水电工程运用最为广泛的门型之一。平面闸门按启闭时门叶的运动轨迹可分为直升式、转动式、横拉式、升卧式等，此外还有浮动式和叠梁式。直升式平面闸门有滑动闸门、定轮闸门和链轮闸门等，转动式平面闸门有人字闸门、一字闸门、舌瓣闸门、翻板闸门和拍门等。

直升式平面闸门 门叶由面板、梁系组成的结构件、支承行走部件及水封装置组成。启闭时门叶沿着垂直轨道上下移动。门叶承受的水压力由支承行走部件传到埋件主轨上，水封设在门叶四周，见图1。这类闸门构造较简单，可提出孔口，多孔口通用，便于维修，能使用移动式启闭机操作，广泛应用于水电工程中。其缺点是：凹型门槽干扰水流流态，容易引起空蚀、振动等问题，不利于闸门的正常运行；动水启闭时需要的启闭力较大；闸墩因凹型门槽削弱而增厚；启闭机安装平台较高。平面闸门的支承行走部件有滑动和滚动两大类，滚动支承又分定轮式和链轮式两种。

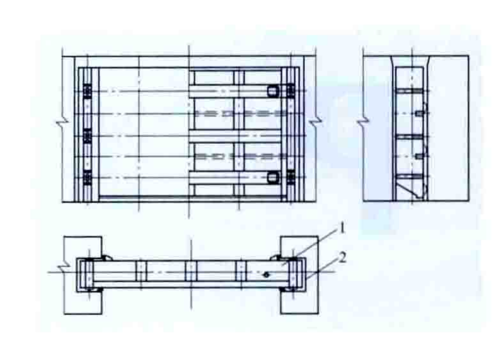


图1 直升式平面闸门示意图

1—门叶；2—门槽

滑动闸门 采用滑块作为支承行走部件的闸门。滑块材料应具有高承压强度和低而稳定的摩擦系数等性能，常用的材料有钢基铜塑复合材料、塑料合金、铜基镶嵌复合材料、增强尼龙和钢铁等。其中，钢基铜塑复合材料和嵌入燕尾槽中的塑料合金的静承压荷载均可达到8kN/mm，高荷载时的最大摩擦系数在0.1以下，但钢基铜塑复合材料表面易刮伤；塑料合金和增强尼龙的吸水率高于复合材料，且易老化；铜基镶嵌复合材料的摩擦系数相对较高。钢材和铸铁滑块摩擦系数大，但在检修闸门或小型工程中仍有使用。

定轮闸门 采用滚轮作为支承行走部件的闸门，优点是启闭时摩阻力小。滚轮的材质按承载大小选取，一般有铸铁、铸钢和合金铸钢等。滚轮按轮轴的支承形式分悬臂式和简支式两种，后者承载能力较大。简支式合金铸钢单轮的承载力已超过5000kN。

链轮闸门 又称履带式闸门，采用短链板串联众多辊柱组成链轮带作为支承行走部件的闸门。启闭时，链轮带绕门叶两侧边梁支承面回转，具有承载能力大、摩阻力小、抗振性能好等优点，但辊柱、链板及轨道等加工要求较高，制造、安装较复杂，维护费用较高。

转动式平面闸门 门叶由结构件、支承行走部件、转动铰和水封装置等组成。启闭时，门叶绕铰轴旋转。常用的有人字闸门和翻板闸门等。

人字闸门 左右两扇以各自的门轴柱为旋转轴的门叶，关闭状态俯视平面呈人字形，两扇门叶形成夹角为140°～145°的水平三铰拱承载，能承受较大的水压力，启闭速度快，广泛用于船闸通航孔口的工作闸门。底枢多为半球形蘑菇头状，顶枢为垂直安装的圆柱轴，顶、底枢作为门叶结构在启闭过程的悬挂支点，主要承载门叶重量产生的水平和垂直荷载，理论上不承载水压力。门轴柱上设有支垫块，与两侧埋件上的枕垫块接触形成三铰拱的两个边铰，在两门叶斜接柱上的支、枕垫块相接触形成三铰拱的中间铰，水压力通过两个边铰传至混凝土结构。侧水封沿门叶高度设置在三个铰的附近，底部设有底水封。三峡水利枢纽五级船闸的六个闸首通航孔口均采用人字闸门挡水，其中最大的单扇门叶尺寸为20.2m×38.5m（宽×高），见图2。



图 2　三峡水利枢纽船闸人字闸门

翻板闸门　又称卧倒闸门，门叶绕底部水平铰轴转动而启闭的闸门。这种闸门挡水时门叶与水平面呈 45°～60°倾斜，开启时门叶向下旋转到水下呈水平状态，具有动水启闭、速度快的特点，适用于山区洪水陡涨河流上泄水建筑物的工作闸门。门叶结构常采用主横梁简支结构、两边支承抗扭结构和底轴支承纵向悬臂结构等形式。中国上海苏州河河口水闸，孔口宽度 100m，成功采用了具有双向挡水功能的底轴驱动式翻板闸门，门叶为底轴支承的纵向悬臂结构。

横拉式平面闸门　门叶结构与直升式平面闸门类似，区别在于其支承部件与行走部件分离，行走部件设置于门叶的底部。启闭时门叶沿水平轨道左右移动。只能在静水条件下启闭，常用于船闸等水平宽度较大的孔口，门底行走机构和轨道易受沉积物阻塞。

升卧式平面闸门　门叶结构与平面定轮闸门基本相同，区别在于其吊点设在门叶下部。启闭时门叶沿下部垂直，顶部水平，中间由一段圆弧段连接的轨道运行。闸门关闭挡水时直立，开启存放时卧倒在孔口上方，可有效降低闸墩机架桥的高度。

Pushihe Choushui Xuneng Dianzhan

蒲石河抽水蓄能电站

(Pushihe Pumped Storage Power Station)　位于中国丹东市宽甸满族自治县长甸镇境内，距丹东市约 60km。电站装机容量 1200MW，以 1 回 500kV 输电线路接入东北电网，担负电力系统调峰、填谷、调频及事故备用任务。

枢纽布置　枢纽工程由上水库、下水库、水道系统、厂房等组成，见图。

上水库　位于蒲石河左岸分水岭以东泉眼沟沟首，坝址以上集水面积约 1.12km^2。水库死水位 360.00m，相应库容 227 万 m^3；有效库容 1029 万 m^3，总库容 1256 万 m^3，相应正常蓄水位 392.00m。大坝为混凝土面板堆石坝，坝顶高程 395.50m，最大坝高 76.5m，坝顶宽 8m，坝顶全长 714m，上、下游坝坡坡度为 1∶1.4。不设泄水建筑物。

下水库　位于长甸镇小孤山子村境内，距上水库约 2.5km，坝址以上集水面积约 1141km^2。总库容为 2905 万 m^3，有效发电库容 1029 万 m^3，相应正常蓄水位 66.00m；水库死水位 62.00m，相应库容 1621 万 m^3。下水库大坝由挡水坝、七孔（每孔净宽 14m）泄洪排沙闸及坝后厂房组成。大坝为混凝土重力坝，最大坝高 34.1m。

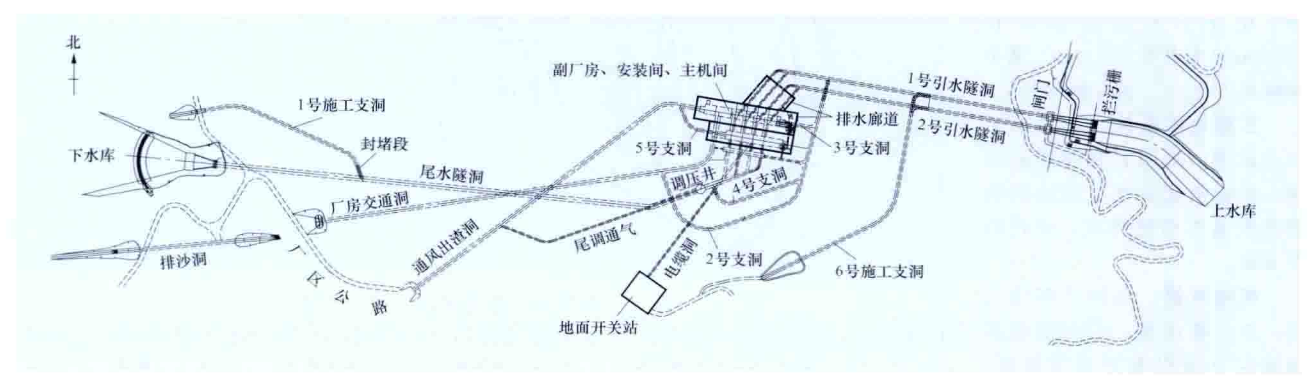
水道系统　由上、下水库进出水口，引水隧洞，尾水隧洞，尾水调压井等组成。引水隧洞采用二洞四机布置，两条引水隧洞由上平段、斜洞和下平洞组成，总长 743m，洞径 8.1m，钢筋混凝土衬砌，衬砌厚度 50cm。下平段后接高压引水岔管，引水岔管内径由 8.1m 渐变至 5.0m，为“卜”形。发电尾水洞采用一洞四机的布置方式，内径为 5m，尾水管至尾闸室范围采用钢板衬砌，其余部分采用钢筋混凝土衬砌。尾水岔管内径由 11.5m 渐变为 5m，采用钢筋混凝土衬砌。尾水隧洞主洞长约 1169m，内径为 11.5m。

尾水调压室为阻抗式，阻抗孔为升管。升管内径 7.5m、高 30m，大井内径 20m、高 80m，均采用钢筋混凝土衬砌。

厂房　主要由主厂房、安装间、副厂房、主变压器洞、母线洞、尾闸室、交通洞、通风（出渣）洞、高压电缆洞等地下洞室组成。主、副厂房，变压器室等均布置在地下，主厂房开挖尺寸为 140.2m×22.7m×54.1m（长×宽×高），副厂房开挖尺寸为 21.6m×22.7m×30.9m（长×宽×高）。主厂房内安装 4 台单机容量为 300MW 的竖轴单级混流可逆式水泵水轮机和发电电动机组。水泵水轮机转轮直径 4.7m，额定转速 333.3r/min，吸出高度 −64m，额定功率 306.12MW，额定净水头 308.0m，发电工况，最大净水头 327.5m，最小净水头 287.7m，最大发电引用流量 445.32m^3/s；抽水工况，最大动扬程 333.9m，最小动扬程 296.9m，最大抽水流量 394.2m^3/s。发电工况额定容量 315.79MV·A，电动工况额定功率 318.02MW，额定电压 18kV，额定功率因数 0.95/0.98（发电/电动）。

500kV 地面开关站设置在高压电缆洞出口地面。地面开关站内布置有 GIS 设备室、出线构架等。采用 1 回出线。

工程施工　电站辅助工程于 2004 年 4 月开工，主体工



蒲石河抽水蓄能电站地下系统平面布置图

程于2006年8月开工，上、下水库坝工程于2007年1月开工。2012年2月1日第一台机组发电，2012年底完工。

主要工程量：土石方明挖304.53万m^3，石方暗挖86.86万m^3，混凝土48.21万m^3，土石方填筑226.5万m^3，钢筋1.22万t，钢材0.31万t。

设计单位 中水东北勘测设计研究有限责任公司。

建设单位 国网新源控股有限公司。

Pubugou Shuidianzhan

瀑布沟水电站 (Pubugou Hydropower Station)

位于中国四川省汉源县和甘洛县境内，是大渡河中游控制性水库梯级，见图1。坝址距汉源县城28km，距成都200km。电站开发任务以发电为主，兼有防洪、拦沙等综合利用效益。装机容量3600MW，多年平均年发电量147.9亿kW·h。通过水库调节可增加下游梯级电站保证出力1087MW，增加多年平均年发电量9.4亿kW·h。水库配合其他措施，可提高乐山市的防洪标准，并可减少长江中下游分洪量，提高防洪能力。以6回500kV输电线路接入四川电网。



图1 瀑布沟水电站

水文和水库特性 坝址以上流域面积68 512km^2，占全流域的88.5%。多年平均流量1230m^3/s，多年平均年径流量388亿m^3。500年一遇设计洪水流量9460m^3/s，相应库水位850.24m；最大可能洪水流量15 250m^3/s，相应库水位853.78m，总库容53.4亿m^3；正常蓄水位850.00m，相应库容50.1亿m^3；汛期限制水位841.00m，死水位790.00m，调节库容38.9亿m^3，属年调节水库。

工程地质条件 坝址地层由玄武岩、凝灰岩和花岗岩组成，均属坚硬岩体。坝址区场地地震基本烈度Ⅶ度，设计烈度8度。

枢纽布置 枢纽工程由大坝、泄水建筑物、引水发电系统和尼日河引水工程等组成，见图2。

大坝 砾石土心墙堆石坝，坝顶高程856.00m，最大坝高186m，坝顶长540.5m，上游坡坡度为1∶2及1∶2.5，下游坡坡度为1∶1.8，坝顶宽14m。心墙采用宽级配砾质土料，筛除粒径大于80mm的粒料。坝基深覆盖层采用两道混凝土防渗墙处理，墙厚1.2m，两墙间净距12.8m；主墙墙顶设灌浆和观测廊道，通过廊道与心墙连接，副墙直接插入心墙。坝体填筑总量为2273万m^3。

泄水建筑物 由岸边溢洪道、深孔无压泄洪洞和放空洞组成。溢洪道紧靠左坝肩布置，设3孔12.0m×17.0m（宽×高）的开敞式进水闸，堰顶高程833.00m，总长约575m，最大泄量6941m^3/s。深孔无压泄洪洞进口为岸塔式，进口底板高程795.00m；工作闸门孔口尺寸11.0m×11.50m（宽×高），最大泄量3418m^3/s。放空洞进口底板高程730.00m，检修闸门孔口尺寸7.0m×9.0m（宽×高），最大泄量1398m^3/s。各泄水建筑物均采用挑流消能。

引水发电系统 布置于左岸，由进水口、压力管道、地下厂房系统、开关站等组成。6条压力管道内径均为9.50m，单洞最大引用流量435m^3/s。压力管道平行布置，6条压力管道总长2797.70m。

地下厂房由主副厂房、主变压器室、尾水闸门室、尾水管及连接洞、母线洞和2条无压尾水洞及其他附属洞室等组成。主厂房尺寸294.1m×26.8m×70.1m（长×宽×高），内安装6台单机容量为600MW的水轮发电机组，转轮直径7.0m，额定水头148m，最大水头181.7m，最小水头114.3m。水轮机和发电机额定效率分别为93.5%和98.6%。主厂房下游平行布置主变压器室和尾水闸门室。无压尾水洞断面尺寸为20m×24.2m（宽×高）。开关站布置在地下厂房顶部地面，高程910.00m。

尼日河引水工程 由首部枢纽和引水隧洞两部分组成。首部枢纽在距尼日河河口15km的开建桥建低闸挡水；引水隧洞沿尼日河左岸布置，隧洞长13.1km，断面尺寸为5.20m×6.20m（宽×高），枯水期引尼日河水入瀑布沟水库，引用流量80m^3/s。

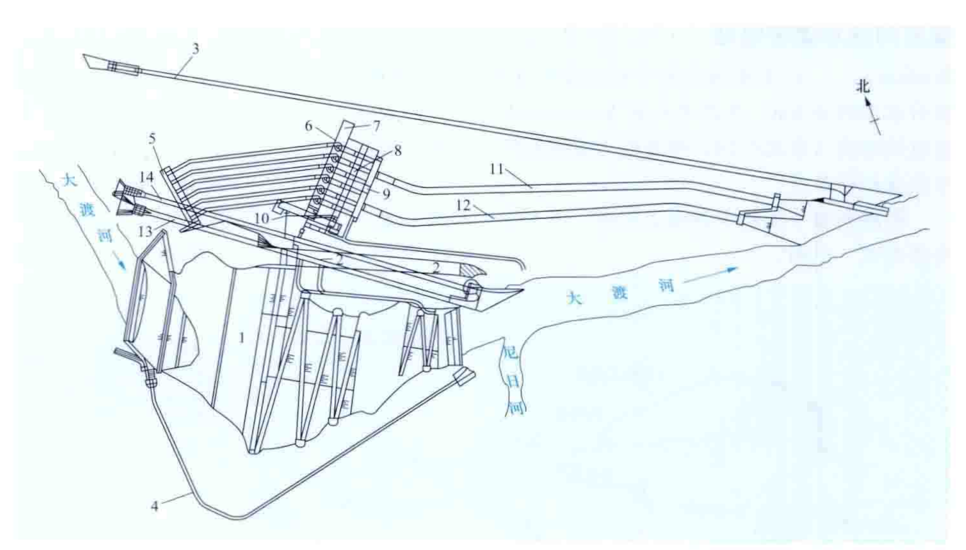


图2 瀑布沟水电站枢纽平面布置图

1—砾石土心墙堆石坝；2—溢洪道；3—深孔无压泄洪洞；4—放空洞；5—电站进水口；6—厂房；7—安装间；8—主变压器室；9—尾水闸门室；10—500kV开关站；11—1号尾水隧洞；12—2号尾水隧洞；13—1号导流洞；14—2号导流洞

工程施工 初期导流采用全年断流围堰、隧洞过流的导流方式。工程于2004年3月开工，2005年11月截流，2009年12月第一台机组发电，2010年12月全部机组投产发电。

主要工程量：土石方明挖1282万m^3，石方洞挖422万m^3，混凝土浇筑257万m^3，土石方填筑2148万m^3，帷幕灌浆25.9万m，固结灌浆22.67万m，钢筋、钢材5.4万t，金属结构安装1.25万t。

设计单位 国家电力公司成都勘测设计研究院（现中国水电顾问集团成都勘测设计研究院）。

建设单位 国电大渡河流域水电开发有限公司。



qibiji

启闭机 (hoist) 用以操作闸门及拦污栅的机械设备。对启闭机的基本要求有：①运行安全可靠；②操作维护方便；③结构简单；④造价和维护费用低。按传动方式不同分为机械式和液压式，常用的机械式启闭机有卷扬式和螺杆式。

卷扬式启闭机 用钢丝绳作为承载构件，多由电动机提供动力，经机械传动装置驱动卷筒旋转，将钢丝绳缠绕在卷筒上来启闭闸门的机械。包括起升机构和机架（门架）两部分，起升机构由钢丝绳、滑轮组、卷筒、传动装置、制动装置、电动机、高度指示及限位装置和负荷限制装置等组成。因钢丝绳是挠性件，关闭闸门时需依靠闸门重量（包括加重及水柱重）。它具有结构简单，制造、维护方便等特点，广泛应用于水电工程中。这类启闭机又有固定式和移动式之分。

固定卷扬式启闭机 将起升机构安装在固定机架上的卷扬式启闭机。分单吊点和双吊点两种形式，双吊点启闭机多在两吊点传动装置间设刚性同步轴，使启闭速度同步。通过变频调速技术控制双吊点电动机转速的电气同步已在工程中得到应用。锦屏二级水电站调压井事故闸门的固定卷扬式启闭机容量达9000kN，最大扬程118m。

移动卷扬式启闭机 将起升机构安装在可移动的门架（桥架、台车架）上的卷扬式启闭机，机型有门式、半门式、桥式、台车式等。启闭机由起升机构、行走机构、门架（桥架、台车架）、馈电装置、司机室和机械房等组成，门架上还可设回转吊或单梁电动葫芦作为副钩。这类启闭机按移动范围还分为单向和双向两种。前者只有门架（桥架、台车架）能沿轨道移动（大车）；后者门架（桥架、台车架）顶部还设有轨道，使起升机构及其机架（小车）在平面上能同时沿着垂直的方向移动。大车行走轨道可以是直线或曲率不大的曲线。行走机构已普遍采用变频调速控制技术，以满足不同工况的调速及准确停位要求。起升机构的动滑轮组常通过自动挂脱梁与闸门连接。溪洛渡水电站8000kN坝顶门机是启闭容量最大的门式启闭机。

螺杆式启闭机 利用螺杆传力原理，驱动承重螺母转动，使起重螺杆作升降运动以启闭闸门的机械设备。螺杆在下降过程中，能对闸门施加一定的下压力。单螺杆容量可达750kN，行程可达7～8m。螺杆启闭机为固定式安装，结构简单、操作方便、造价低廉，动力可为手动或电动，但机械效率低，多用于小型水电工程。

液压启闭机 利用液压传动原理，由液压泵电动机组把机械能转换成油液的压力能，推动液压缸内的活塞及活塞杆作往复运动来启闭闸门的机械设备。按工作特点分为单作用式和双作用式；按液压缸布置形式分立式、卧式和斜置式；按液压缸的支承结构分固定式、浮动式、端部铰轴和中部铰轴支承式；按闸门吊点数量分单吊点和双吊点式。液压启闭机一般由泵站设备、液压缸及其支承结构和液压管路三部分组成。泵站设备设于机房内，包括液压泵电动机组、液压控制阀组、电气控制柜、油箱及附件等；液压缸可露天布置，泵站设备与液压缸之间用液压管路连接。液压启闭机具有体积小、重量轻、设备布置紧凑、启闭容量大、便于实行自动化和远程控制等优点，广泛应用于各类水电工程中。溪洛渡水电站进水口快速闸门液压启闭机容量达10 000kN，行程达11.5m；草街航电枢纽冲沙闸弧形闸门液压启闭机容量达2×5000kN，行程达13.7m。

qiti jueyuan jinshu fengbi shudian xianlu

气体绝缘金属封闭输电线路 (gas insulated metal enclosed transmission line，GIL) 将导体封装在充以压缩绝缘气体的金属封闭管道内的电力线路。绝缘介质为SF_6或SF_6和氮气（N_2）的混合气体。电气特性与架空线路相似，无绝缘老化问题，电能损耗低，安全防护性好，占地面积和占用空间小，用于电站高压引出线和电力系统主干线路的电力传输，特别适合于大容量、长距离输电回路，且布置上受地质、地形条件和枢纽布置限制，技术经济上又合理可行的场所。GIL可采用隧道、竖井、斜井、户外等布置安装方式，也可采用直埋敷设。

结构形式 按结构形式不同，分为共相式和分相式两种，一般采用分相式。GIL为刚性结构，外壳与导体同轴布置，导体采用高电导率铝合金材料，外壳采用铝合金材料。外壳有两种连接方式，一种是法兰连接，单元间采用密封工艺及螺栓连接（如美系产品），另一种为现场焊接（如德系产品）。无论是法兰连接还是现场焊接，这两种方法都对现场环境的要求很高，清洁度要高，湿度要低。

受道路运输及现场布置条件限制，GIL全部在工厂里制造装配，预制成单元组件（一般长12～18m），之后再运到工地现场进行组装。GIL外部接口一般与气体绝缘金属封闭开关设备（GIS）、高压电缆、架空线路、变压器和电抗器等连接。

设备特点 GIL的主要特点有：①电能损耗小，载流能力强，可以大功率、长距离传输电能，输送容量可达4GW，最大工作电流可达8000A，适用于大容量输电回路。②占地面积和占用空间小，布置灵活。SF_6是一种高绝缘强度且无腐蚀的优质绝缘介质，在均匀电场下其绝缘强度是空气的2～3倍，灭弧能力约为空气的100倍，因而GIL元件体积小，能把各种电器紧凑地组合在一起，有效地减小占地面积和节省空间。③元件故障率极低，供电可靠性高，运行安全可靠。GIL没有暴露在大气中的外绝缘，不受风、雨、冰、雪、潮湿以及气压变化的影响，也杜绝了小动物或其他外物引起的闪络事故。④金属外壳具有隔离和屏蔽作用，电容电流小，无触电危险和电磁干扰，与周边环境友好相处。⑤安装工期短，运行维护工作量小，检修间隔周期长。GIL出厂

前已调试合格，现场安装、调试简单。GIL漏气量极小，一般年漏气率小于0.5%，不需清扫绝缘子，平均检修周期为20年以上。⑥造价较高，一次投资费用大。

简史 GIL技术研发始于20世纪60年代，70年代初开始生产和投入使用。美国是世界上最早开发GIL的国家之一。1972年生产第一回242kV/1600A单相长414m的GIL，用于美国新泽西州的Hudson电厂；1981年和1984年生产的1200kV/5000A单相长90m和330m的GIL均为单相试验线路，用于美国DOE Waltz Mill，并于1986年完成高电场热循环长期运行试验；1987年投运了迄今世界上最大高差305m的230kV GIL，用于美国Balsam Meadow抽水蓄能电站。

德国在20世纪六七十年代已研究成功第一代采用纯SF_6气体的GIL。1975年投运了第一条长度为700m的420kV GIL，用于德国南部的Wehr抽水蓄能电站。自20世纪90年代起，又成功研制了第二代GIL，主要是用SF_6与N_2混合绝缘气体代替纯SF_6气体绝缘。

GIL是新一代的超高压导体电器，技术开发较快，345、400、500kV和800kV GIL均已研发成功并投入商业运行，1200kV GIL也已在美国投运。美国、欧洲和日本的超高压GIL使用较多，其中美国、日本生产的GIL采用纯SF_6气体，而德国则采用20% SF_6+80%N_2的混合气体。

GIL于21世纪初开始在中国兴起并逐渐使用。中国已建和在建工程中，拉西瓦、锦屏（一、二级）、糯扎渡、溪洛渡水电站，张河湾、呼和浩特抽水蓄能电站，大亚湾、岭澳（一、二期）、田湾一期、红岩河一期核电站，香港青山、广东湛江奥里油电厂，三峡宜都、上海华新换流站等都采用了GIL。其中，拉西瓦水电站800kV GIL（高差210m）为中国已建工程中最高电压等级，已于2009年成功投入运行。

qiwen

气温 (atmospheric temperature) 表示空气冷热程度的物理量。用摄氏度（℃）表示，也有用华氏温度（℉）表示的，在理论研究中常用绝对温度（T_0）表示。三者的转换关系为

$$t\ (℃) = 5\,[t'\ (℉) - 32]\,/9$$

$$t\ (℃) = T_0 - 273.15$$

气象台（站）地面观测中测定的是离地面1.5m高度处的气温。测定的项目有定时气温和日最高、最低气温。在对流层内，接近地表的大气温度较高，距离地面越高，气温越低，平均每提高100m，气温约下降0.65℃。

大气温度是影响天气变化的主要因素之一，故气温既是天气预报的主要内容，又是据以分析、预报其他天气现象的重要依据。在水电站设计和建设中，混凝土坝在计算温度应力、考虑施工方法及安排工程进度时，气温也是一项重要的基础资料。

在工程设计中，一般需统计年（月、旬、日）平均气温、极端最高气温和极端最低气温。

qixiang yaosu

气象要素 (meteorological elements) 构成和反映大气状态和大气现象的基本因素。主要包括云、能见度、气压、气温、湿度、风、降水、蒸发、日照、地温、冻土及各种天气现象。各项气象要素，与农业和其他国民经济建设关系密切，也是水电站设计、施工和运行管理的基础资料。

云 悬浮在大气中的小水滴、过冷水滴、冰晶或其他混合物组成的聚合体。一般要观测云状、云高和云量。云状是指云的外貌；云高是指云底距地面的高度，分为低云、中云、高云；云量是指云遮蔽天空视野的成数。

能见度 视力正常的人在当时天气条件下，能够从天空背景中看到和辨认出大小适度的目标物的最大水平距离。在夜间是指能看到和确定出一定强度灯光的最大水平距离。气象台（站）观测的是水平能见度，目标物的仰角不宜超过6°。

日照 表示太阳照射时间长短的量。有可照时数和实际照射时数（日照时数）两种。太阳中心从出现在某地东方地平线到进入西方地平线，其直射光线在无地物、云、雾等任何遮蔽物的条件下照射地面的时间，称为可照时数。太阳在某地实际照射地面的时数称为日照时数。测定日照时数的仪器有暗筒式和聚焦式两种日照计。

地温 地面和地面下不同深度土壤的温度。一般气象台（站）观测地面温度和地面下浅层及较深层土壤的温度。地面温度指直接与土壤表面接触的温度表所示温度，包括地面及地面最高、最低温度。浅层地温指离地面5、10、15、20cm深度的土壤温度；较深层地温指离地面40、80、160、320cm深度的地中温度。

冻土 含有水分且温度下降到0℃或以下时呈冻结状态的土壤。冻结层次及其上限与下限深度根据埋入土中的冻土器内水柱结冰的部位和长度测定。

天气现象 发生在大气中和地面上的降水现象、水汽凝结冻结现象、干质悬浮物、光电现象等。降水现象有雾、雨、雪、霰、冰粒、冰雹等；水汽凝结冻结现象有露、霜、雨凇、雾凇等；干质悬浮物如沙尘暴、扬沙、沙尘烟幕、霾等；光电现象有雷暴、闪电、极光。此外还有大风（瞬间风速达到或超过17m/s）、飑（突然发作的强风，持续时间短促）、龙卷风（一种小范围的强烈旋风，破坏性强）等现象。

qiya

气压 (atmospheric pressure) 作用在单位面积上的大气压力。等于单位面积上向上延伸到大气上界的垂直空气柱的质量。气压的计量单位过去习惯上用水银柱高度表示。自1914年起许多国家改用力的单位毫巴（mbar）计量，一个标准大气压（760mmHg）等于1013mbar。1982年1月世界气象组织（World Meteorological Organization，WMO）采用帕（Pa）作为气压单位，并以百帕（hPa）为基本单位。1984年2月中国的气压计量单位也改用百帕，1百帕（hPa）=1毫巴（mbar）。

测定气压的仪器主要用动槽式和定槽式水银气压表。要求连续记录气压变化的可用自记气压计。根据气压表读数计算本站的气压，要进行仪器、温度和重力差的订正。盒式气压表比较简单，常在野外查勘时用。

气压随高度按对数规律减小。近地面层气压随高度的递减率约为每10m降低1hPa。随高度的上升，空气密度减小较快，递减率也随之减小。温度变化会引起空气膨胀、流动，

改变其密度。受热多的地区，气压降低；受热少的地区，气压升高。因此地球表面气压随地区、时间而变。根据各地测定的气压，绘制订正到海平面的平均气压分布图，可供分析大气环流的特征及其变化之用，对天气预报具有实用意义。

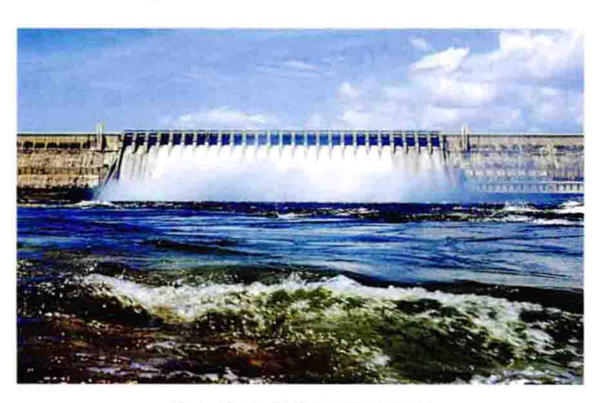
qishiba

砌石坝 (masonry dam) 用石料砌筑而成的坝。其主要优点有：①就地取材；②比混凝土坝节约水泥和钢材；③工程量比土石坝少；④泄洪和导流布置较土石坝简单，安全性也较高；⑤施工技术简单。主要缺点是耗用劳动力较多，难以用机械化方法施工，工期较长。砌石坝按坝型分为砌石重力坝、砌石拱坝和砌石支墩坝；按砌筑方法可分为干砌石坝和浆砌石坝，多采用浆砌石坝。

砌石材料 坝体石料应质地均匀，没有裂缝，不易风化，饱和抗压强度不低于 30～40MPa，吸水率一般不超过 10%，软化系数一般不小于 0.7。常用的石料有毛石、块石和条石。浆砌胶凝材料常用水泥砂浆，有时也采用小石子水泥砂浆、细骨料混凝土、水泥石灰砂浆、水泥黏土砂浆等。

构造特点 砌石坝的设计基本上与混凝土坝相同。砌石体的物理力学指标主要取决于胶凝材料的性能和砌筑密实度。由于石料间的砌缝很难填筑密实，需在坝体上游面或靠近上游部分设置防渗层，如混凝土防渗面板、沥青混凝土防渗面板、钢丝网水泥喷浆护面、水泥砂浆勾缝和其他防渗层。与混凝土坝不同，砌石坝一般不设纵缝和横缝；当设横缝时，缝的间距较大。

简史 很早以前人类即用砌石筑坝。中国最古老的、迄今仍在运行中的砌石坝有：公元前约 250 年在四川省都江堰水利枢纽上建成的干砌卵石分水堰，公元前 219 年在灵渠（湘桂运河）上建成的干砌块石和卵石溢流坝。印度纳加琼纳萨格（Nagarjun-nasagar）砌石重力坝坝高 125m，坝体体积 561 万 m^3，是世界上最高和坝体方量最大的砌石坝，见图。中国最高的砌石重力坝为河北省朱庄水库的砌石坝，坝高 95m。世界上最高的砌石拱坝是中国河南省群英浆砌石重力拱坝，高 101m。中国山东省东风浆砌石双曲拱坝，坝高 84m，厚高比 0.16。20 世纪 70 年代以来，中国还兴建了很多新型砌石坝，如湖南省岩屋潭砌石空腹重力坝（高 66m）、浙江省大溪垄干砌石溢流坝（高 27m）、河北省小龙潭浆砌石框格填渣重力坝（高 39.6m）和福建大田六角宫细骨料混凝土砌石拱坝（高 79m）。由于砌石坝施工费力费时，多用于中小水电工程。



纳加琼纳萨格砌石重力坝

Qiantang Jiang shuixi shuineng ziyuan

钱塘江水系水能资源 (hydropower resources of Qiantang River System) 根据《中华人民共和国水力资源复查成果（2003 年）》统计，钱塘江水系水能资源理论蕴藏量为 194.97 亿 kW·h/a，占中国水能资源的 0.32%；其中技术可开发水能资源 72.19 亿 kW·h/a，占中国水能资源的 0.29%。

钱塘江为浙江省第一大江，发源于浙江、安徽、江西 3 省交界处。干流华埠以上称马金溪，华埠至衢州段称常山港，在衢州纳江山港后称衢江，在兰溪纳金华江后称兰江，在梅城纳新安江后称富春江，在闻家堰纳浦阳江后称钱塘江。钱塘江（至闸口段）流域面积 4.19 万 km^2，干流长 477km，落差约 732m，多年平均年径流量 300 亿 m^3。

钱塘江水系支流众多，水能理论蕴藏量 10MW 以上的各级支流有 43 条，水能资源较分散。干流水能理论蕴藏量 37.06 亿 kW·h/a，仅占全水系的 19%。水能理论蕴藏量大于 100MW 的支流有乌溪江、新安江、分水江 3 条河流，水能理论蕴藏量 52.86 亿 kW·h/a，占全水系的 27.1%。其余的 2/3 的理论蕴藏量分布于其他支流中。

干流衢州以上河段属山溪河流，径流量较少。衢州至三河埠河段流经金衢盆地，为浙江省重要的粮食与经济作物区，布置调节水库及水能资源开发的条件较差。三河埠至七里泷为峡谷河段，是干流水能资源开发条件最好的河段，已建有富春江水电站，装机容量 297.2MW，多年平均年发电量 9.23 亿 kW·h。七里泷以下为感潮河段，没有开发条件。

钱塘江水系水能资源开发条件较好的支流有乌溪江、新安江和分水江，已建有湖南镇、黄坛口、新安江、富春江和华光潭一级 5 座大中型水电站，总装机容量 1371.7MW，多年平均年发电量 35.96 亿 kW·h。钱塘江水系水能资源开发较早，已基本开发完毕，以上 5 座已建大中型水电站多年平均年发电量占全水系可能开发单站装机 10MW 以上水电站多年平均年发电量的 67.5%。

qingwuji

清污机 (trash-removal machine) 清除拦污栅栅面及栅前污物的机械设备。清污机主要有耙斗式、回转栅式、竖直抓斗式和压污耙式 4 类，其中耙斗式和回转栅式运用较多。

耙斗式清污机 利用可张合的齿耙沿拦污栅面上下移动来抓取污物，由清污耙斗、操作机构和车架组成。其中耙斗的开闭方式分为绳索式和液压驱动式，车架可做成固定式或移动式。耙至坝顶的污杂物由专用设备运走。这类清污机广泛应用于水电站进水口，单位清污量大，使用效果良好。

回转栅式清污机 由带钩的拦污栅片组成若干组回转式链板，通过驱动机构的带动，使带栅片的链板作回转运动来挂取污物。这类清污机适用于污物量大的河流上的中小型水电站进水口，其清污效率较高，但集中清污能力较低，抗过载能力一般。

竖直抓斗式清污机 又称颚式清污机，用抓斗来抓取栅前堆积的较大杂物的机械设备。

压污耙式清污机　主要借助压污耙的重量或外加压力，将栅面上的淤积物沿栅面推刮至栅槽底坎以下位置，再借设在栅孔下部的排污底孔将污物冲走。

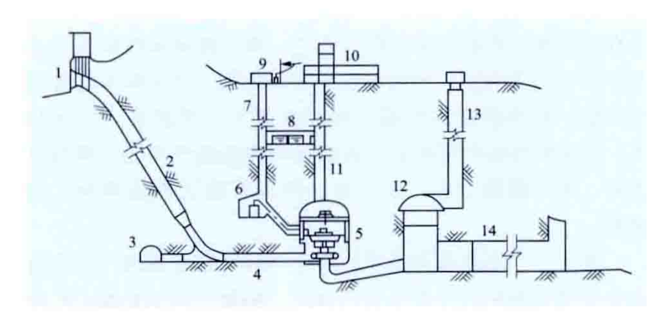
Qiuji'er Pubu Shuidianzhan

丘吉尔瀑布水电站

(Churchill Falls Hydropower Station)　位于加拿大拉布拉多半岛纽芬兰省哈密尔顿(Hamilton)河（又名丘吉尔河）上，装机容量5428MW，年发电量345亿kW·h。大部分电力售给相邻的魁北克省，采用3回735kV特高压输电线路送电，距离1300km。

水文和水库特性　坝址以上流域面积6.93万km^2，多年平均年径流量439亿m^3。正常蓄水位448.60m，总库容334亿m^3，调节库容283亿m^3，库容系数β_1为0.64，可进行多年调节。设计洪水标准为10 000年一遇，洪峰流量17 000m^3/s。校核洪水采用可能最大洪水，洪峰流量30 600m^3/s。

枢纽布置　枢纽工程由大坝、泄水建筑物、引水发电系统等组成，见图。



丘吉尔瀑布水电站地下式厂房系统剖面图

1—进水口；2—混凝土衬砌压力斜洞；3—施工洞；4—钢板衬砌高压洞；5—主厂房；6—变压器室；7—电缆井；8—防火储水室；9—开关站；10—控制及管理楼；11—交通井；12—尾水调压室；13—通气井；14—尾水洞

大坝　共有主、副坝88座，总长64km，平均坝高9m。前池坝最大坝高36.5m。

泄水建筑物　建有4座控制闸和2座溢洪道，总泄流量22 300m^3/s。

引水发电系统　电站为引水式，通过2.1km长的隧洞取得约300m的水头发电。厂房为地下式。11条压力斜洞，每条长427m，上段用混凝土衬砌，洞径6.1m，下段用钢板衬砌，钢板厚38～44.5mm，洞径4.3m。主厂房洞室长300m，宽25m，高50m。主厂房上游侧设变压器洞，长261m，宽15.2m，高11.9m。下游侧设尾水调压室，长233m，宽15.9m，高45m。下接2条不衬砌的尾水洞，各宽13.7m，高18.3m，长1690m。开关站和电站的控制管理楼设在地面。

厂房内安装11台混流式水轮发电机组。两种水轮机转轮直径分为6.00m和6.10m，转速200r/min，出力分别为475MW和500MW。发电机额定容量500MV·A，功率因数0.95和1.0。经过两次变压升至735kV后送出。

工程施工　工程于1967年8月开工，1971年12月首批2台机组发电，1974年9月建成。主要工程量：土方填筑2021万m^3，地下石方开挖300万m^3，混凝土浇筑15.6万m^3。

qiufa

球阀

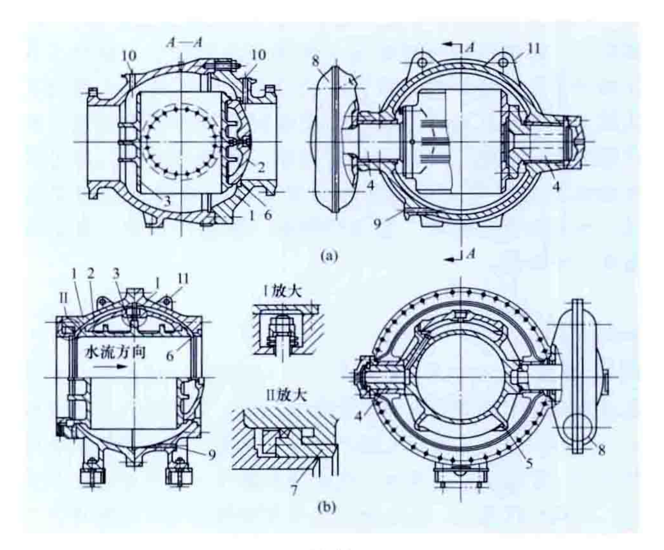
(rotary valve; spherical valve)　安装在水轮机蜗壳前的引水钢管上，活门内有圆筒形过流通道且外形呈球状的阀门。球阀由阀体、活门及阀轴、密封装置、操作机构、附属设备组成。由于球阀活门的圆筒形过流通道与压力钢管可形成顺畅的水流通道，因此全开时水力损失接近于零。球阀一般用在水头大于200m的水轮机上。立轴球阀因结构复杂，下端轴处因积沙易卡，已被淘汰，一般都采用卧轴球阀。

阀体　阀体通常采用铸钢件。一般为分半结构，对称分半时分半面在转轴中心线上，其分半面螺栓受力大而不均；偏心分半时分半面偏下游侧，其分半面螺栓受力小而均匀。有时也采用不可拆的焊接结构，其尺寸和质量小。

活门与阀轴　活门过流通道呈圆筒形，长度略大于直径，两侧壁中部各有一端轴支承在阀体的轴孔中，全开时圆筒形过流通道正对引水钢管，全关时圆筒转90°，靠活门壁上的工作密封盖和阀壳下游密封面止水。有的活门没有密封盖，采用环形密封面。

密封装置　分为单面密封和双面密封，见下图。单面密封只有工作密封，设在下游侧，用密封盖和阀壳下游密封面止水。有时采用阀壳下游工作密封圈和活门上的环形密封面止水。为了在不放空压力钢管的情况下检修工作密封，单面密封球阀需在上游再装一个检修球阀。单面密封球阀已很少采用。双面密封球阀的下游侧有工作密封，阀壳的上游侧还设有检修密封，必要时可用检修密封止水，对工作密封检修。有的双面密封球阀的活门可转180°，以便将活门上的两个环形密封面调换使用。密封盖或密封圈一般用钢管压力水操作，滑动面用不锈钢制作。固定、活动止水面常用硬度不同的不锈金属制成，精加工后研磨啮合，以保证在水压作用下不漏水。

操作机构　大中型水电站的进水球阀均用液压系统操作接力器实现。为增加事故关闭的可靠性，球阀可用重锤关闭。



球阀

(a)单面密封球阀（偏心分半）；(b)双面密封球阀（对称分半）

1—阀壳；2—工作密封盖；3—活门；4—端轴；5—环形密封面；6—下游密封面；7—上游检修密封圈；8—环形接力器；9—排沙孔；10—旁通管；11—吊耳

附属设备　一般有向下游充水的旁通阀及排气阀、装拆球阀用的伸缩节、排除阀壳底部积沙的排沙阀，以及向密封盖内充压或泄压的供水阀和卸荷阀。

quyu gouzao wendingxing

区域构造稳定性　(regional tectonic stability)　根据建筑物所在地区一定范围、一定时段内断层和地震活动性综合确定的该区域稳定程度。区域构造稳定性是影响水电工程经济合理、安全可靠的重要因素之一，是水电工程地质勘察的重要工作之一，其内容包括区域地质构造背景研究、断层活动性研究、地震安全性评价、区域构造稳定性综合评价等。

在河流规划阶段，根据区域构造稳定条件，合理确定河流的开发方式和梯级布局等，对影响工程开发的区域构造稳定条件还要进行专题研究。预可行性研究阶段，需要完成工程场址区域构造稳定性分析与评价工作，为工程建设可行性、场址选择、建筑物抗震设计等提供决策依据和基础资料。

区域地质构造背景研究　通过收集有关区域地质资料和开展区域地形地貌、地层岩性、地质构造、新构造活动及变形、地球物理场及深部构造、区域构造应力场、区域地震活动等调查，在分析研究的基础上，判断区域构造的活动性。调查范围是坝址周围不小于150km地区。

断层活动性研究　结合地形地貌、地质构造、地层切断情况、地震、测年资料等，综合分析，确定断层活动性。重点勘察研究范围是坝址周围25km范围内，尤其是场址区周围5km范围内断层的活动性。

地震安全性评价　在系统收集整理现有地震、地质资料基础上，对工程场址区及近场区进行详细的地震、地质调查，分析研究地震活动的时空强度特征、中强地震发震标志，划分地震区、带和潜在震源区，并研究相应的地震活动性参数，进行地震危险性分析，确定工程场地地震动参数和对地震地质灾害进行预测与评价。

区域构造稳定性综合评价　在研究地质构造、地应力、地形变、断层活动与地震安全性评价的基础上，结合工程区地表岩土体稳定性，进行综合分析，最终确定工程近场区及工程场址区的构造稳定性及地质灾害的影响程度。结合构造分区和稳定性分区，分别对工程研究区域、近场区及场址区进行构造稳定性综合评价。区域构造稳定性分级，可分为稳定性好、稳定性较好、稳定性较差、稳定性差等4个级别。

quyuxing tu

区域性土　(regional soil)　分布在一定地区，在当地自然环境下形成的具有特定性状的土。岩石风化成土过程中，在不同地区，由于气温、降水、蒸发、排水等环境条件的差异，通过分解、淋滤、化合和积聚等一系列物理化学变化，生成性质各异、具有新的成分和结构的土，其物理力学性质和工程特性显示出地区特点。地球上分布较广的区域性土有黄土、红土、膨胀土和冻土，这4类土在中国都有分布。

黄土　主要分布于中纬度的干旱和半干旱地区，多集中在大陆内部，总面积1300万km^2。在中国，黄土的分布面积有64万km^2，大都位于北纬33°～47°。黄土属于第四纪沉积物，成因有风成、水成和多种成因3种学说，其中以风成说较占优势。黄土呈黄色、褐黄色和灰黄色。垂直节理发育，能保持很高的直立陡壁。有肉眼可见的大孔隙，颗粒成分以粒径为0.075～0.005mm的粉粒占多数（约60%以上）。富含碳酸钙盐类，黏土矿物以伊利石为主。土中黏粒连接成薄膜，包裹着粉粒，形成松散排列的土骨架。干燥时具有足够的结构强度以维持其高孔隙结构，一旦被水浸湿，土颗粒间的胶结作用被削弱以致遭到破坏，土骨架崩溃，产生湿陷变形，丧失抗剪强度。建筑工程中以湿陷系数确定黄土湿陷的强弱；以累积湿陷量划分黄土地基的湿陷等级，并根据研究确定处理措施。

红土　多分布于热带与亚热带地区。中国长江以南广大地区都有红土存在，其中以云南和贵州两省比较集中。在这些地区，温度高，降雨量大，排水条件好，岩石中的二氧化硅、碱和碱土金属在成土过程中遭到淋滤，倍半铁、铝氧化物明显积聚，最终生成红色、红棕色和以高岭石黏土矿物为主的残积、坡积红土。土中的黏粒通过颗粒表面的正、负电荷相吸和铁、铝氧化物的胶结作用，相互叠聚和连接成大小不等的稳固集合体，组成红土的特殊结构。红土的天然含水量和液、塑性限度都很高，黏粒含量大，密度低，压实性差，但压缩性属中等偏低，抗剪强度和渗透性均比一般黏性土高。在工程建设中，红土是一种良好的天然地基和工程材料。

膨胀土　在热带和温带的半干旱地区都有发现，大多分布在年蒸发量超过年降水量的地区。膨胀土的主要黏土矿物是蒙脱石，矿物表面的负电荷、晶格间的结合强度、交换性阳离子的性质和容量等都影响其膨胀势能。凡黏性土和水相互作用时都要产生膨胀，包括水分子进入不稳定晶格而产生的晶内膨胀和颗粒表面形成水化膜而产生的粒间膨胀。从工程角度出发，只把在结构物荷重下，遇水浸湿能增加体积而对工程结构物有影响的土称作膨胀土。保持土体原始体积不变所需的压力就是土的膨胀力，在表面无载荷情况下自由膨胀的百分比称膨胀量，被用作评定膨胀势能的指标。膨胀土经过浸水膨胀和干燥收缩的循环作用，膨胀量将随循环次数的增加而减少，抗剪强度一再削弱。膨胀土的膨胀和收缩都可能对工程产生破坏作用。

冻土　分为永冻土和季节性冻土。全球范围内，永冻土有3500万km^2。中国的东北和西北地区除分布季节性冻土带外，在大小兴安岭北部、青藏高原、天山和阿尔泰山区也有永冻土区。含水的土冷却到0℃以下时，土孔隙中的水结成冰，土中水分转移，使土体产生冻胀。其影响因素主要有土类、含水量、地下水条件、温度和压力。在天然条件下，冻土按冰的胶结程度分为坚硬冻结、塑性冻结和松散冻结，各自的力学特性有很大差异。冻土有较高的瞬时强度，但长期强度却相当低。冻土融化时产生附加沉降，称为融沉，并丧失大量强度。季节性冻土的冻胀和融沉，极易使工程遭受破坏。

参考书目

Proceedings of the International Conference on Engineering Problems of Regional Soils. Beijing: International Academic Publishers, 1988.



renqun jiankang baohu

人群健康保护 (public health protection) 采取预防和治疗措施减免因水电站建设引起的流行病学因素变化和疾病流行。

根据工程区域主要疾病统计数据，在水电站工程建设期和运行期，采取预防为主、加强监测的策略，从传染源、传播途径和易感人群三个环节，对施工区、水库淹没区和移民安置区疾病进行综合防治。

施工区和移民安置区的人群健康保护主要包括卫生清理、传染源和传播媒介消除、食品和环境卫生管理、卫生防疫、卫生教育五个方面。卫生清理是在施工营地/移民安置点开挖、平整前对废弃物进行清理，选用石炭酸，采用喷雾消毒。传播媒介消除是每年在施工营地/移民安置点投放鼠药、毒饵、鼠夹、灭害灵等药物和工具，减少蚊、蝇、鼠等自然疫源性疾病和虫媒传染病的传染源和传播媒介。食品和环境卫生管理包括选择良好的饮用水水源，对饮用水进行消毒和跟踪监测，定期对公共餐饮场所进行卫生清理和检查，对服务人员定期体检，保持施工营地/移民安置区环境卫生，对粪便、污水和生活垃圾及时进行无害化处置等。卫生防疫是在充分依靠地方卫生防疫部门的力量，对施工人员和移民进行卫生检疫和定期体检，对易感人群接种并发放预防性药物，建立并严格执行疫情报告制度。卫生教育是根据工程区域的疫情状况，制订人群健康教育计划，采取各种形式对施工人员和移民进行卫生宣传教育，加强个人防护能力，增强群众自我保护意识和防病能力，减少感染机会。

水库淹没区人群健康保护主要是对库区进行库底卫生清理和消毒，主要包括将坟墓、林木彻底迁出库外，采用暴晒、喷洒漂白粉溶液或生石灰、填埋等措施，对水库淹没区的垃圾、粪便、工业废渣、废弃矿渣（井）、建筑物、坟墓等进行清理。

rengong guliao

人工骨料 (artificial aggregate) 开采的石料经过机械破碎、筛分、冲洗而制成的混凝土骨料。其粗骨料通常称为碎石骨料，粒径范围一般为5～150mm；细骨料通常称为人工砂，其粒径小于5mm。

人工骨料棱角多、颗粒表面粗糙、表面积比天然骨料大，拌制的混凝土一般比天然骨料（卵砾石）拌制的和易性差，用水量多，水泥用量较大。但人工骨料与水泥胶结的咬合力相对较大，拌制的混凝土抗压强度相对较高。人工骨料的粒径、细度模数和级配是按设计需求生产的，质量、数量较容易满足设计要求。根据需要生产过程可控，因此产生的废弃料少。

人工骨料料场可根据水电站布置特点调查多个料场进行勘探、试验。在选择料场时，要遵循质量优良、经济、就地取材、少占耕地的原则。选择便于开采、储量相对集中、料层厚、无用层及覆盖层相对较薄、破碎后粒型良好且硬度适中的料场，经过技术经济比选确定。在材料质量满足工程要求的条件下，利用工程开挖料作为人工骨料料源，不仅开采费用低，还可节省弃渣占地，是人工骨料的首选料源。石灰岩的强度适中、线膨胀系数较小，是生产人工骨料较好的材料。

料场开采时，应根据所在地区的水文、气象、地形条件以及对外交通状况，研究料场开采道路、开采顺序、运输方式等，并合理选择采、装、运设备，满足高峰期采运强度要求（见图）。开挖时爆破设计应控制岩块粒径，适应装运以及破碎设备要求，并防止废料混入及二次转料。同时做好料场开采区边坡支护、水土保持和环境保护等。



向家坝人工砂石料加工系统

ruku hongshui

入库洪水 (inflow flood) 从水库周边汇入水库及由库面降雨所形成的洪水。入库洪水由4部分组成（见图1)：①干流入库站（A站）洪水过程；②支流入库站（B站及C站）洪水过程；③区间（A、B、C站至坝址区间）入流过程；④库面降雨过程。

水库建成后，由于形成条件的变化及洪水的地点不同，入库洪水与坝址处天然洪水，往往存在一定的差别，表现为：①坝址天然洪水是经过库区河槽调蓄，汇流到坝址断面；建库后，入库洪水是由水库周边汇入水库的洪水，不经过库区河槽调蓄。②建库后，水库淹没区由原来的陆面变为水面，陆面降雨和蒸发变为水面降雨和蒸发，改变了库区降雨的产流、汇流条件。③由于洪水波在库区传播速度加快，区间洪水与干流洪水的遭遇有可能改变。

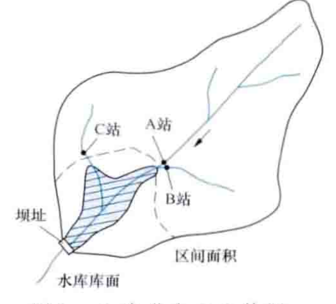


图1 入库洪水汇流简图

这些变化造成建库后的入库洪水比坝址天然洪水洪峰增高，涨水段洪量增大，洪峰出现时间提前，见图2。实际资料表明，洪峰一般增大1.01～1.20倍，个别可以达到1.50以上。当洪峰增大系数大于1.05时，用入库洪水作为设计洪水更加符合建库后的实际情况。

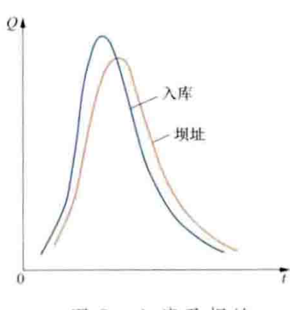


图2　入库及坝址洪水过程示意图

为配合水库调洪计算，入库洪水可分为分散型与集中型两种。分别给出上述4部分洪水过程线的称分散型入库洪水，适合用水力学不恒定流方程组计算库区洪水演进。当用水文学水量平衡法进行水库调洪时，需将分散型入库洪水合成为集中型入库洪水。

ruanji chuli

软基处理 (treatment of soft foundation)

对软弱坝基进行加固和防渗处理的工程措施。软基通常由各种松散材料构成，包括砂砾石、砂、黏性土及各种特殊土类。一般来说，砂砾石坝基的强度和变形性质易于满足要求，对其主要是渗流控制处理。软黏土坝基是低透水性的，主要是加固处理，以提高强度和减小压缩性。还有一些特殊软基的处理，如易液化的饱和松砂和少黏性土的防止液化处理、湿陷性黄土坝基的防止湿陷变形处理等。

砂砾石坝基的渗流控制　基本形式有上游防渗铺盖、垂直防渗设施和下游反滤排水设施以及上述各种设施的综合应用。

上游防渗铺盖　将防渗土料覆盖在上游透水坝基表面，形成防渗铺盖，以增加渗径，减小渗透压力和渗漏量。它常结合下游排水反滤设施一起使用，以控制渗透压力和保证渗透稳定，但防渗效果有限。对渗漏量要求不高，而建造垂直防渗设施又有困难的工程，特别是对中小型工程，是一种可行的防渗措施。透水坝基表面完整的天然黏性土层和多泥沙河流上的水库淤积物可以用作天然铺盖。铺盖和地基之间要设反滤层。

垂直防渗设施　常用的有开挖回填截水槽、混凝土防渗墙和灌浆帷幕3种。它们能有效并可靠地截断坝基渗漏，对大型和重要工程应优先采用。

（1）开挖回填截水槽。优点是需要机械设备较少，工程质量有保证。以前常用于深度在20m以内的透水地层，利用大型施工机械后，挖填能力增强，对较深厚覆盖层有时也选用此方案。回填材料有黏土、混凝土等。泥浆截水槽是用机械在泥浆下开挖沟槽，而后用开挖出来的材料与泥浆混合后回填，用于低水头的水工建筑物，也可归纳到截水槽一类内。

（2）混凝土防渗墙。用机械在泥浆固壁作用下建造圆孔或槽孔，在其中浇筑混凝土，形成圆柱或槽板，并相互搭接成墙。常用的造孔机械有冲击钻、冲击反循环钻、液压抓斗等。回填材料除混凝土外，也可采用黏土、自凝灰浆、固化灰浆等，高水头的工程多采用回填混凝土的防渗墙。临时性或低水头的工程可采用高压定向喷射法建造水泥土防渗墙。

（3）灌浆帷幕。通过钻孔向砂砾石层中灌注水泥浆、水泥黏土浆或水玻璃等胶凝材料，固化后形成防渗帷幕，适用于可灌性好的深厚砂砾石层。在各种方法中，以套阀花管法最为有效和可靠，中国于1960年在密云水库白河主坝坝基处理中曾实际应用，已正常运行50余年。

下游反滤排水设施　可使渗透水顺利排走而不带走土骨架颗粒，并可降低坝体浸润线，减小渗透水压力，保证建筑物及地基的稳定。排水设施与周围料物的颗粒级配要严格满足反滤要求。在下游土体有可能发生流土破坏时，可加设透水盖重层，以提高抗流土能力。

软黏土坝基加固处理　软黏土含水量大、密度低、压缩性高、抗剪强度小，虽经加固处理，承载力提高也有限，不宜用作大坝及其他重型建筑物的天然地基。用作低坝及一般水工建筑物地基时，可采用换土、设置砂垫层、排水预压加速固结、砂桩置换、深层搅拌、高压喷射注浆、土工合成材料铺垫或加筋等方法处理。（见土体加固）

易液化坝基处理　见土体液化。

湿陷性黄土坝基处理　黄土粒间主要由无机盐类和黏土胶结，在干旱条件下具有足够的结构强度，能维持低密度、高孔隙结构，而在浸水时结构强度削弱或消失，使结构崩溃而导致大量突发沉降，为湿陷性。建筑物常因浸水湿陷引起的大量不均匀变形而受到破坏。处理的原则是消除湿陷性。处理方法有：①表面或深层预先浸水，在建筑物修建前或修建过程中完成大部分湿陷；②用重锤夯实、强夯、挤密桩等方法加密，消除高孔隙结构，从而避免浸水湿陷；③用物理化学方法，如硅化法、碱液化、热处理法等，使黄土的结构强度转化为水稳定性的，将高孔隙结构固化下来，不因浸水软化而崩溃。

ruanji kancha

软基勘察 (soft foundation exploration)

为论证各类土层作为天然地基的地质调查研究工作。软基包括砂砾石、砂性土、黏性土、黄土类土等地基。这些土层作为水工建筑物地基，主要工程地质问题有：①易压缩变形且不均匀；②抗剪强度低，抗滑稳定性差；③透水性强，渗漏量大；④抗渗透稳定性差，易产生渗透破坏（流土、管涌、接触冲刷、接触流失等）；⑤遇水湿陷；⑥地震液化、振动液化及软土震陷等。

勘察任务　查明各类土层的成因、埋藏条件、地质结构、物理力学性质，结合建筑物布置及形式，评价地基承载力、变形、抗滑稳定、渗透稳定，以及渗漏、湿陷、地震液化等的可能性及严重程度，提出有关处理建议。

勘察内容　调查工作区地形地貌，各类土层的分布及所处地貌单元，土层的厚度、连续性、接触关系；研究各类土的颗粒组成、密实度、抗剪强度、变形模量、承载力、透水性、渗透变形特征、地震液化；对于黏性土、淤泥以及黄土等，对其含水量、崩解性、湿陷性等进行研究。

勘察方法　主要有地质测绘、勘探及试验。工程地质测绘的精度可根据勘察阶段及具体地形、地质条件确定。物探勘探，用以快速了解土层厚度、划分土层的层次、测试动参数及地下水位。坑槽探，用于地下水位以上的土层勘探、取样及现场测试。钻探，主要是获取各土层的厚度、分布特

征，采取原状试样进行室内物理力学试验，并可利用钻孔进行压（注）水试验、抽水试验与孔内原位测试等。现场原位试验方法可选择：①载荷试验。在试坑中一定尺寸的平板上逐级加荷，测各级载荷的沉降，可确定地基承载力和变形模量。②静力触探。将符合规格的锥形探头，按一定速率压入土中，量测土对探头的阻力，以判断土的性质。③动力触探。利用一定能量的落锤，将符合规格的探头打入土中，据其难易程度判断土的性质。④十字板剪切试验。使用插入土中的标准十字探头，以一定的速率扭转，量测土破坏时的抵抗力矩，测定饱和软黏土的不排水抗剪强度和灵敏度。⑤现场剪切试验。对试坑中的试件，在不同垂直荷重下进行剪切，根据剪切强度与垂直应力的关系，确定土的摩擦角和凝聚力。⑥剪切波测试。以物探仪器测土层的弹性波速，换算土的剪切模量和动弹性模量。

工程地质评价　首先要评价土层的可利用性，在此基础上进一步分析评价其工程特性与问题。

（1）确定承载力。根据土层的物理力学性质、现场原位试验以及相关经验分层提出。

（2）对于软基的压缩变形及不均一性特性作出评价。

（3）采用刚体极限平衡方法对地基土的抗滑稳定性作出评价。

（4）对地基土的透水性以及渗漏量作出评价，提出防渗措施建议。

（5）根据土的颗粒级配、不均匀系数、细粒含量及允许水力坡降等，分析地基土渗透破坏形式，提出处理措施建议。

（6）依据土层的地质年代、性质（湿陷性系数）、层位、含水量及成因等方法判定有无湿陷性和作出评价。

（7）对非黏性土，根据土层的天然结构、颗粒组成、密实性、埋藏条件和标准贯入击数等综合分析判别的地震液化可能性，按勘察阶段要求通过初判和复判做出有无液化及处理建议评价。当以软基作为动力基础时尚应对振动液化问题进行判别与评价。对淤泥、软黏土类软土，其抗压强度低、灵敏度高、压缩性强，在饱和振动条件下抗剪强度会降低，一般宜以塑性指数、无侧限抗压强度、标准贯入击数等指标综合判别。



Sayang-Shushensike Shuidianzhan

萨扬-舒申斯克水电站 (Sayano-Shushensk Hydropower Station) 位于俄罗斯西伯利亚叶尼塞河上游的萨扬峡谷出口，舒申斯克村附近。电站开发任务以发电为主，兼有航运利用效益。总装机容量6400MW，多年平均年发电量235亿kW·h，是俄罗斯建成的最大水电站。电站以500kV超高压输电线与西伯利亚联合电力系统相连接。

水文和水库特性 坝址以上流域面积18万km^2，多年平均年径流量467亿m^3。正常蓄水位540.00m，相应库容313亿m^3，回水长度290km，调节库容153亿m^3。大坝按10 000年一遇洪水设计，洪峰流量15 900m^3/s。

工程地质条件 坝址地层由前寒武系坚硬的结晶片岩组成，抗压强度达150MPa。

枢纽布置 枢纽工程由大坝、泄水建筑物和厂房等组成。远景规划拟增建升船机。

大坝 混凝土重力拱坝，坝顶长1066m，坝顶高程547.00m，最大坝高245m，最大坝厚100m，见图。大坝平面呈弧形，曲率半径为600m。沿坝自右至左分为右岸非溢流坝段、溢流坝段、厂房坝段和左岸非溢流坝段。坝基帷幕灌浆深度100m。



萨扬-舒申斯克水电站大坝

泄水建筑物 溢流坝设有11个溢流孔，每孔宽5m，设计泄流量13 600m^3/s，下游设消力池。

厂房 坝后式厂房，厂房长288m，内装10台水轮发电机组。压力钢管内径7.5m，以背管方式布置在坝体下游面。混流式水轮机，转轮直径6.77m，转速142.8r/min。额定水头194m，流量358m^3/s，额定出力650MW。转轮采用耐空蚀不锈钢制造。发电机为伞式，额定容量711MV·A，转子采用强制风冷，定子采用水内冷。采用晶闸管励磁。两台机组连接一组容量为1599MV·A的单相变压器组，形成扩大单元接线，升压至500kV。

工程施工 工程于1963年着手施工准备，1968年9月开工，1978年12月第一台机组发电，全部10台机组于1987年安装完毕。

提前发电措施：电站在施工阶段采取了两项提前发电措施：①在坝体较低的3个高程上设置6个临时进水口，供先期投产的6台机组引水发电；②首批投运的2台机组采用直径为6.05m的临时转轮，在60～140m水头范围内发电，出力分别为155MW和400MW，当水库水位超过460.00m高程后，再更换正式转轮。

主要工程量：土方开挖量1082万m^3，石方开挖量616万m^3，土石方填方1172万m^3，混凝土总方量979万m^3，金属结构和设备安装10.1万t。

水电站事故及修复 2009年8月17日8时13分（当地时间），因电站水轮机顶盖螺栓发生疲劳破坏，高压水冲入厂房，造成自动化电气保护系统失效等一系列破坏，最终导致水淹厂房的重大事故。在开展抢险和事故调查工作的同时，组建了电厂修复工作组，并制定了电站秋冬季安全泄水运行方案。2010年4台机组经修复重新运行，2012年1～3月先后投产2台新制造机组。新机组机组效率为96.6%，寿命40年，计划于2014年底前全部投入运行。由于消力池在施工期与运行初期多次发生严重冲蚀，考虑到泄洪安全问题，修复重建工作在右岸增建2条泄洪洞，下接台阶式岸边溢洪道。

Sanmenxia Shuili Shuniu

三门峡水利枢纽 (Sanmenxia Hydroproject) 位于黄河中段下游，河南省三门峡市和山西省平陆县交界处，是黄河干流上兴建的第一座大型水利枢纽，具有发电、防洪、防凌、灌溉等综合利用效益，见图1。电站原设计安装8台机组，装机容量1160MW，多年平均年发电量60亿kW·h。后经3次改建，现有机组7台，装机容量400MW，多年平均年发电量13.17亿kW·h。



图1 三门峡水利枢纽

水文和水库特性 坝址以上流域面积68.84万km^2，多年平均年径流量424亿m^3，多年平均流量1344m^3/s。工程设计洪水标准为：1000年一遇设计，10 000年一遇校核。改建后设计洪水流量40 000m^3/s，相应库水位329.00m；校核洪水流量52 500m^3/s，相应库水位332.60m。改建后，水电站最大水头52m，最小水头15m，设计水头30m。

工程的建设和改造历程 工程于1957年动工兴建，按正常蓄水位350.00m施工，相应初始总库容354亿m^3。1960年水库蓄水，1962年第一台机组试发电。水库蓄水后，由于泥沙淤积，库尾河床抬高，造成上游大量农田被淹并威胁城镇安全。因此，试发电后不久，电站即停止运行。为减缓淤积，保持调节库容，尽可能发挥水库防洪、防凌、灌溉效益，于1964～1981年间先后两次进行改建。第一次改建，增建2条泄洪排沙洞，改建5～8号4台机组段为泄洪管。第二次改建，打开1～8号施工导流底孔，将其改造为泄流排沙底孔，并将1～5号机组的进水口高程降低13m，相应改建引水钢管，以实现“蓄清排浑，调水调沙”的运用原则。改建后，在库水位315.00m时的泄流能力，由原来的3080m^3/s增加到10 000m^3/s。电站装机容量降为250MW，年发电量为10.2亿kW·h，运用最高水位为340.00m。经多年运行后，泄流排沙底孔因长期运用，泥沙磨蚀严重，于1985年又对1～8号底孔进行了二期改建，并打开和改建9、10号施工导流底孔，以扩大枢纽泄流能力；恢复原6号和7号机组段，重新安装了2台单机容量为75MW的混流式水轮发电机组，使水电站装机容量达到400MW，多年平均年发电量达到13.17亿kW·h。

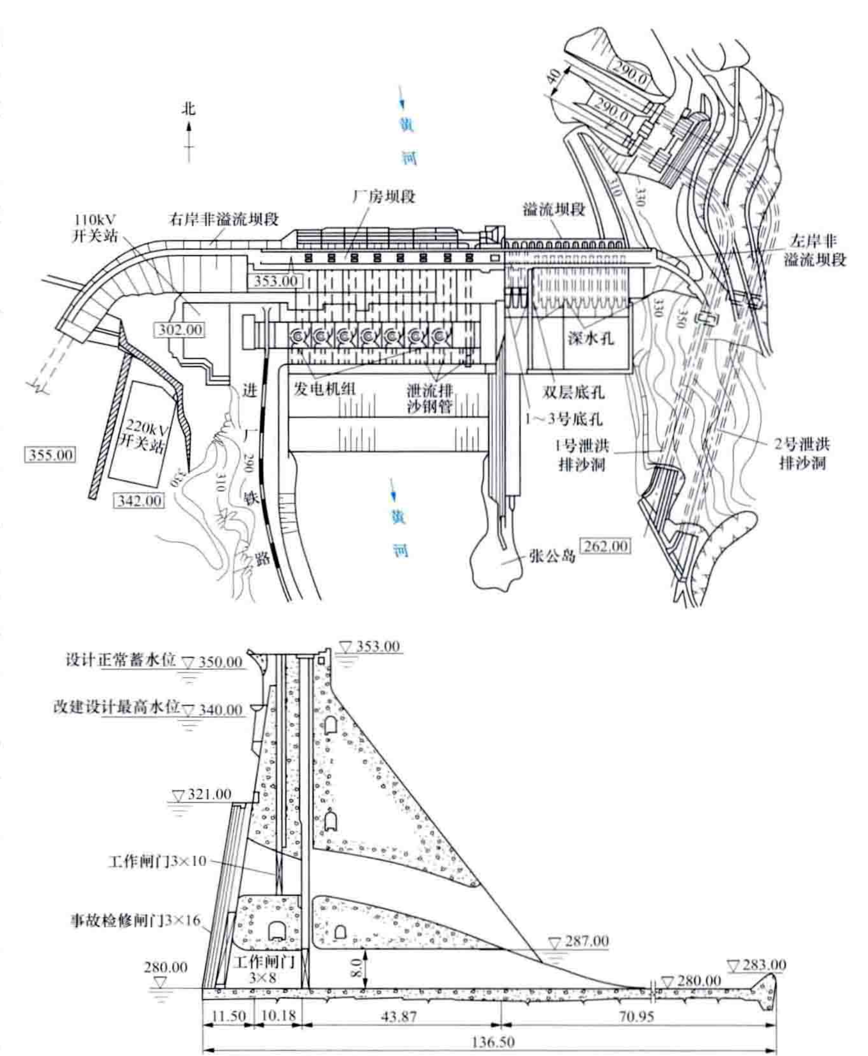


图2 三门峡水电站枢纽平面布置及大坝剖面图（单位：m）

枢纽布置 枢纽工程由大坝、泄水建筑物、厂房等组成，见图2。

大坝 混凝土重力坝，坝顶长713m，最大坝高106m。

泄水建筑物 左岸设有泄洪排沙洞2条，明流段断面为城门洞形，宽9m，高12m。水位330.00m时，最大泄流量为2658m^3/s。大坝设有深水泄水孔12孔和泄流排沙底孔10孔，断面尺寸均为3m×8m。水位330m时，最大泄流量共9746m^3/s。

厂房 改建后，厂房1～5号机组段安装5台50MW竖轴转桨式水轮发电机组，额定转速100r/min。水轮机转轮直径6.00m。发电机为悬式空冷型，额定电压10.5kV，额定容量为62.5MV·A，额定功率因数0.8。6、7两个机组段安装单机容量为75MW的混流式水轮发电机组，水轮机额定水头36.00m，最大水头47.70m，最小水头27.40m，转轮直径5.50m，额定转速88.2r/min。发电机为悬式空冷型，额定电压13.8kV，额定容量88.235MV·A，额定功率因数0.85。110kV开关站位于厂房右侧，双母线间用混凝土结构分为两层，每层均为典型中型布置，运行维护方便。220kV开关站布置在厂房下游右岸。

设计单位 苏联列宁格勒水电设计院设计。改建设计单位为天津勘测设计研究院（现中水北方勘测设计研究有限责任公司）。

sanshi shuilun fadianji

伞式水轮发电机 (umbrella hydro-generator)

见立式水轮发电机。

shabo yundong

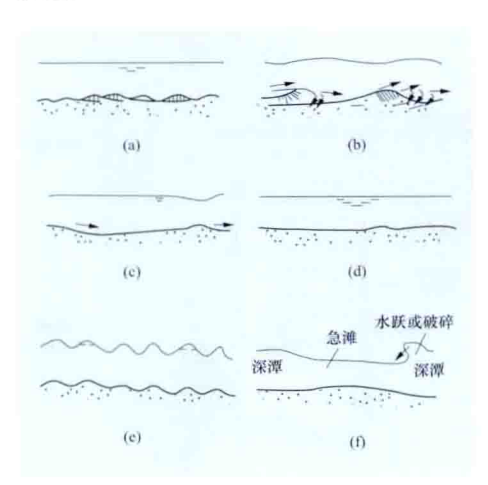
沙波运动 (sand wave motion)

推移质泥沙颗粒在河床床面的群体运动形式。凡是推移质运动达到一定强度的处所，河床表面便形成起伏不平的沙波。室内试验和室外观测均表明，随着水流强度的变化，沙波有其产生、发展和消失的过程。一般随着水流强度的加强，河床有沙纹、沙垄、过渡、动床平整、沙浪及急滩与深潭等几个阶段，见图。

(1) 沙纹（ripples）。沙纹具有三角形的纵剖面，长度

一般不超过 30～40cm，高度不超过 3～4cm。

（2）沙垄（dunes）。剖面形状与沙纹类似，但尺寸较沙纹大。



沙波不同发展阶段示意图

(a) 沙纹；(b) 沙垄；(c) 过渡；(d) 动床平整；(e) 沙浪；(f) 急滩与深潭

（3）过渡（transition）。随着水流强度的增大，沙垄趋于衰微，波长逐渐加长，波高逐渐减小。

（4）动床平整（flat bed）。床面恢复平整，但有较强的泥沙运动。

（5）沙浪（antidunes）。随着流速再次加大，接近或处于急流状态时，床面再次产生起伏的沙浪。

（6）急滩与深潭（chutes and pools）。流速再增加时，床面的起伏剧烈，急滩与深潭相间，急滩段水流属急流，深潭段水流属缓流，两者间通过水跃过渡。

沙波形成后产生的形态阻力是冲积河流阻力的主要组成部分。随着沙波的发展消长，沙波阻力也相应发生很大变化。根据水流及泥沙条件，可以预报床面出现的沙波形态及其阻力。也可以利用沙波的尺寸和运动速度来推算推移质输沙率。沙波运动与水流阻力和床面形态有密切的关系，正确预报沙波运动的发展阶段、沙波形态及沙波阻力对于防洪、航运、给水等部门都很重要。

参考书目

钱宁，万兆惠．泥沙运动力学．北京：科学出版社，1983.

shalishi diji guanjiang

砂砾石地基灌浆

（sand and gravel foundation grouting） 对砂砾石地基进行处理的灌浆。其主要目的是建造防渗帷幕。一般有两种情况：①用于临时性工程，如围堰地基防渗；②用于永久性工程，如大坝地基的防渗帷幕，它必须与大坝自身的防渗体紧密相连。

在砂砾石地基上建坝时，坝基防渗采用灌浆帷幕方法的主要优点是帷幕对地基变形的适应性好，施工中灵活性大，尤其适用于深厚砂砾石层的坝基防渗处理。

在砂砾石层进行灌浆时，必须查清地质情况，如砂砾石层的组成和分布，其中有无黏土和砂的夹层，夹层厚度如何；砂砾石层的渗透性；砂砾石层的颗粒级配等。

对某种固粒浆液而言，其对砂砾石层是否可灌，一般常依可灌比值（M）而定。可灌比值通常以下式表示

$$M=D_{15}/d_{85}$$

式中 D_{15} 为受灌砂砾石层的颗粒级配曲线上含量为15%处的粒径，mm；d_{85} 为灌注材料的颗粒级配曲线上含量为85%处的粒径，mm。一般情况下，当 $M\geqslant10$ 时，可灌注水泥黏土浆；当 $M\geqslant15$ 时，可灌注水泥浆。

砂砾石地基帷幕灌浆设计之前，应先进行现场灌浆试验，以试验所得的成果作为设计的主要依据。灌浆时一般需设置盖重和制定表层处理措施，进行浆液配合比设计和浆液试验，确定灌浆施工次序。

帷幕的形式有均厚式和阶梯式两种。前者帷幕厚度相同，也就是各排灌浆孔的深度相同，多用于较浅的砂砾石层；后者帷幕厚度不同，上部排数多，下部排数逐渐减少，呈上宽下窄的阶梯状，多用于深厚的砂砾石层。帷幕的深度，一般要求穿过砂砾石层进入基岩。阶梯式帷幕中一般均有1～3排孔进入基岩。

砂砾石层灌浆一般采用水泥黏土浆。水泥与黏土的质量比为1∶1～1∶4，干料与水的质量比（浆液浓度）为1∶1～1∶3。浆液结石28天强度要求达到0.5MPa。选用黏土的条件一般为：塑性指数10%～20%；颗粒（<0.005mm）含量不少于40%～50%；颗粒（0.005～0.05mm）含量不多于45%～50%；含砂量小于5%；有机物含量小于3%。

常用的灌浆方法有打管灌浆法、套管灌浆法、循环钻灌法、预埋花管法4种。钻孔的方法依使用的灌浆方法和砂砾石层组成状况而定，可以采用冲击式钻进，也可采用旋回式钻进。当采用循环钻灌法和预埋花管法时，允许使用泥浆。

帷幕灌浆完毕后，钻检查孔，做注水或压水试验，求得渗透系数，检验其是否满足设计要求。

通过工程实践，在砂砾石层中使用水泥黏土浆进行灌注，渗透系数可以降低到 $10^{-5}\sim10^{-4}$cm/s，若欲再行降低，一般需加用化学灌浆。

Shanluo Shuidianzhan

山萝水电站

（Son La Hydropower Station） 位于越南西北部山萝省境内的沱江（亦称黑河）上，坝址距首都河内市250km，为一多目标开发工程，主要开发任务为发电和防洪。电站装机容量为2400MW，多年平均年发电量94亿kW·h，为越南装机容量最大的水电站。

水文和水库特性 流域面积43.769km²，年径流量48.32m³，可能最大洪水流量60 000m³/s。水库正常蓄水位215.00m，总库容92.6亿m³，有效库容65.04亿m³。

枢纽布置 枢纽工程由大坝、泄水建筑物和坝后厂房等组成，见图。



山萝水电站

大坝　碾压混凝土重力坝，最大坝高138.1m，坝顶长961.6m，顶宽10m，底宽90m，下游坝坡坡度为1∶0.727 5。碾压混凝土方量307.8万m^3，主要浇筑位置为非溢流坝段、厂房坝段进水口高程以下。常规混凝土方量236.8万m^3，主要浇筑位置为溢流坝段、厂房坝段进水高程以上部位以及预应力混凝土部分。

泄水建筑物　6孔溢洪道位于大坝右侧，正常高水位下泄流能力为38 240m^3/s，采用弧形闸门控制，闸门尺寸为6.75m×10.5m。溢洪道分三区，中间设隔墙。

坝后厂房　厂房位于左侧，内安装6台混流式水轮机组，单机容量400MW，总装机容量2400MW。机组额定水头83.65m，最大水头101.6m，最小水头57m。6台机组最大过流量为3438m^3/s。

施工及运行　工程于2005年底开工。施工期设计流量为21 000m^3/s，分4期导流，采用河床及位于电厂右侧2个12m×13m的涵洞导流。大坝碾压混凝土于2008年1月开始浇筑，2010年8月底全部完工，最高月浇筑量为20万m^3。首台机组于2011年1月投产发电，当年4台机组投产运行，2012年10月实现6台机组全部投产发电。

sheji gaisuan

设计概算 (budgetary estimate of project design)

水电工程可行性研究设计阶段预测的工程造价。是项目进行国民经济评价及财务评价的依据；设计概算经审查后，是国家投资管理部门确定和控制固定资产投资规模、核准或审批建设项目的依据；是项目法人筹措建设资金、签订贷款合同以及控制、管理项目工程造价的依据；是国家有关部门对建设项目进行稽查、审计的依据；是合理测算和确定项目上网电价的参考依据；是进行项目竣工决算和项目投资后评价的对比依据。按照国家现行政策法规、规程规范、水电行业的概算定额和编制办法，依据可行性研究报告计算的设计工程量，采用编制年价格水平（人工、材料、施工机械使用费以及设备价格等）编制形成以货币量表现的费用总和。工程项目投资一般应采用工程量乘工程单价计算，个别次要工程项目采用类比或单位造价指标进行估算。

设计概算文件由编制说明、概算表、概算附表和附件组成。设计概算的计算精度高于投资估算。

sheji hongshui

设计洪水 (design flood)

符合指定设计标准的洪水。包括水工建筑物正常运用条件下的设计洪水、非常运用条件下的校核洪水、施工期的设计洪水，以及下游防洪对象的设计洪水。它反映水工建筑物或防洪对象抗御洪水的能力，是水利水电工程的重要设计数据。校核洪水是为提高工程安全和可靠程度所拟定的高于设计标准的洪水，用以对水工建筑物的安全进行校核。当水工建筑物遭遇此种洪水时，安全系数允许作适当降低，部分次要建筑物允许破坏，但主要挡水建筑物（坝）应保证安全。设计洪水的计算内容主要包括设计洪峰流量、不同时段的设计洪量及设计洪水过程线。根据水工建筑物所采用的洪水标准的不同，计算方法有频率分析法和水文气象法两类。

频率分析法　用于计算各种不同频率的设计洪水，依据流量资料、雨量资料和地区综合分析资料估算。

（1）根据流量资料计算。工程所在地或其附近上下游有较长的实测洪水资料（包括插补延长的资料长达30年以上），可逐年选取最大洪峰流量及不同时段（如最大24h、3d、7d等）的最大洪量，分别组成系列，进行频率计算，确定相应于设计标准的设计洪峰流量和洪量。设计洪水过程线一般采用放大典型洪水过程线推求，按求出设计洪峰流量和各时段设计洪量对典型洪水过程线进行同频率或同倍比放大（见设计洪水过程线）。

（2）根据雨量资料计算。工程所在地及其附近的洪水资料过少，但流域内具有较长期的实测雨量资料（包括插补延长的资料长达30年以上），并有暴雨洪水对应关系时，可先进行设计暴雨计算，再通过产流和汇流计算，推求设计洪峰流量、洪量和洪水过程线。

（3）用地区综合分析资料估算。对于短缺洪水和暴雨资料的中小流域，可根据地区综合资料（如水文手册、暴雨径流查算图表等）查算工程所在地点有关暴雨和洪水的统计参数，估算设计洪水。

水文气象法　用于计算可能最大洪水。适用于当设计采用土坝、堆石坝时，失事后对下游将造成特别重大灾害的1级永久性挡水和泄水建筑物非常运用洪水标准。（见可能最大洪水）

sheji hongshui guochengxian

设计洪水过程线 (design flood hydrograph)

符合设计洪水标准的一次洪水流量过程。是设计洪水的组成部分，也是水利水电工程进行洪水调节计算，确定泄洪建筑物的规模和尺寸的重要设计依据。设计洪水过程线的计算方法有由流量资料计算和由暴雨资料计算两类。

由流量资料计算　以实测的典型洪水过程线作为放大的典型。典型洪水过程线的选择要能代表流域上大洪水的一般特性，并选择峰高量大，洪峰发生时期偏后且对工程不利的实测洪水过程为典型。设计洪水过程线的放大计算方法有同倍比放大法和同频率放大法两种。

（1）同倍比放大法。用同一个放大比值放大典型洪水过程线。放大比值按下式计算

$$K_Q = Q_p / Q_r$$

或

$$K_{wt} = W_{tp} / W_{tr}$$

式中K_Q、K_{wt}为洪峰流量及某一时段洪量放大系数；Q_p、Q_r为设计洪峰流量和典型过程线的洪峰流量；W_{tp}、W_{tr}为历时t的设计洪量和典型过程线的相应历时t的洪量。

对调节能力较小的水库，可取洪峰的倍比K_Q放大洪水过程线；当水库较大、泄量较小时，应按洪量放大系数K_{wt}放大洪水过程线。

（2）同频率放大法。用设计洪峰和不同时段的设计洪量同频率控制放大典型洪水过程线，各时段放大比值按下式计算

$$K_Q = Q_p / Q_r, K_{w1} = W_{1p} / W_{1r}$$

$$K_{w2} = (W_{2p} - W_{1p}) / (W_{2r} - W_{1r})$$

式中Q_p、W_{1p}、W_{2p}为同频率的洪峰流量及各时段洪量；Q_r、

W_{1r}、W_{2r}为典型洪水过程线的洪峰流量和相应各时段洪量。

同倍比放大法计算简便，适用于峰量关系较好的河流，特别是对多峰型的洪水过程线或为分析洪水地区组成时使用。同频率放大法适用于洪峰洪量关系不够好的河流，或洪峰洪量均对水工建筑物防洪安全起控制作用的工程。控制时段一般只用2～3个时段。

由暴雨资料计算　通过设计面暴雨、设计雨型时程分配的计算以及产流和汇流计算，可直接求得设计断面处的洪水过程线。

sheji hongshuiwei

设计洪水位 (design flood level)

见校核洪水位。

sheji nianjingliu

设计年径流 (design annual runoff)

相应于设计标准的年径流量及径流系列。年径流设计标准常以保证率或频率表示。设计年径流是水力发电、灌溉、供水、航运等工程规划设计的一项重要水文数据，其计算内容包括：①设计年径流量计算，它反映工程所在河段总的来水条件，是一项重要径流特征值。②不同保证率的年径流年内分配，它反映设计流域径流量的年际变化与年内水量分配情况，代表未来工程运行期间可能出现的径流来水过程。年径流的设计保证率是根据用水部门的要求确定的，发电保证率常采取90%～95%，灌溉保证率常采取75%～80%，城市及工业用水保证率常采取95%～100%。

设计年径流量计算　根据工程所在地点的水文资料条件，采用不同的计算方法，常用的方法有频率计算法、等值线图法、水文比拟法等。

(1) 频率计算法。当工程所在地点或其附近上下游有较长期的实测径流资料（30年以上，包括插补延长的资料在内）时采用此法。首先对实测资料作可靠性、系列的一致性及其代表性的检查。如果实测资料的流域受到人类活动影响，径流发生显著变化时，要作还原计算使其恢复到未受人类活动影响的天然状态，以达到系列的一致性。还原计算的主要项目有工农业生活耗水量、蓄水工程的蓄泄水量、分洪溃口水量、跨流域引入或引出水量等。系列代表性分析根据还原后的天然径流系列进行，主要是通过分析本流域或邻近相似流域的多年丰、枯周期的变化情况，对比分析径流统计参数等，评定其系列的代表性。若系列代表性不足，应设法延长系列或参照地区综合成果，对统计参数作适当的调整。通过计算确定的统计参数（多年平均流量、离差系数和偏差系数），即可求得各不同保证率的年径流量。（见水文频率分析）

(2) 等值线图法。适用于缺乏水文资料的中小流域中的工程设计。由于水文现象和地理因素之间常存在着一定的内在联系，因而水文参数多呈现地理分布规律。利用这种规律，可对短缺水文资料的地区进行水文计算。中国各省、市（区）编制的水文手册绘制出了年径流统计参数等值线图，依此查算工程所在地点的统计参数，即可求得不同保证率的年径流量。

(3) 水文比拟法。缺乏水文资料的设计流域，可采用此法推求，即将水文相似区内参证站设计年径流，并考虑面积、降雨等因素，经修正后移用于该设计流域。

不同保证率的年径流年内分配　径流在一年内随时间变化的过程。当工程所在地点有较长期径流资料时，选取接近于设计保证率年径流量的年份为典型，并缩放至与设计值一致，作为该保证率的代表年。无实测资料地区，设计年径流量的年内分配，可借用参证站或水文手册提供的年内各月水量分配百分比进行估算。当计算成果与调查成果相差较大时，应对计算成果进行适当修正。

shehui huanjing baohu

社会环境保护 (social environment protection)

采取措施减免水电站建设对社会环境造成的不利影响。水电站的建设与运行对社会环境的影响有有利的，也有不利的。水电站建设对社会环境的不利影响主要体现在人口、人群健康、景观和文物影响及其他影响等方面（见社会环境影响），成为制约水电站建设的主要问题之一。由此，社会环境保护也相应成为水电站建设环境保护中的一项重要内容。水电站社会环境保护主要包括移民安置环境保护、人群健康保护、景观和文物保护及其他保护等方面。

移民安置环境保护　采取一系列措施减免因工程施工占地和水库淹没造成的居民迁移产生的次生环境影响。减免措施主要包括土地资源保护、生活污水处理、生活垃圾处理、人群健康保护、生态环境保护、生活质量保护6个方面。土地资源保护是为移民合理开发和配置土地资源，满足移民生产生活需要；生活污水处理是采取沼气池、化粪池、污水处理站等措施，对移民安置点的粪便污水和洗涤污水进行无害化处理、达标排放或回用农灌；生活垃圾处理是对移民安置点的生活垃圾进行分选，可生化垃圾进入沼气池堆肥，不可生化垃圾经垃圾筒、垃圾收集站统一收集后，根据生活垃圾规模和安置点周边环境要求选择外运、卫生填埋等措施进行最终处置；人群健康保护包括饮用水源的保护、蓄水池卫生消毒、移民安置点环境卫生清理、建设卫生防疫机构、易感人群疫苗接种、疫情监测等措施；生态环境保护是在移民安置点的建设过程中尽量减少占地，保护森林植被，对施工迹地进行植被恢复，对安置点及其周边荒山进行绿化，防治水土流失；生活质量保护是对移民进行补偿，减免税收，优惠水电价格，优先上学、就医、就业，提供生产技术指导，建设民风民俗活动场所等，保证移民的生活质量不降低，促进移民尽快融入当地社会经济和文化生活中。

人群健康保护　见人群健康保护。

景观和文物保护　包括景观保护和文物保护两个方面：①景观保护按照避免、协调、补偿的原则和层次开展。首先，在主体工程规划和设计中避开有重要保护要求的自然和人文景观；其次，调整主体工程规划和设计，从色彩、材料、风格上使其与周边自然景观相协调；在无法避免和协调、不得不破坏或侵占自然和人文景观时，根据工程实际和影响程度采取替代措施，并对景观损失予以补偿。②文物保护包括对受工程影响的地面和地下文物进行原地保护、搬迁保护或资料留取。当水电工程建设影响的仅是文物的局部，且对文物主体影响不大，或是具有特定地域意义的文物时，采取围堤、筑坝、加固、防护的保护措施；当文物主体受水

电工程建设影响很大而又不能或不应搬迁的，在原地保护的基础上，采取原位升高复制、异地复制或局部异地复制的措施；当文物整体将被工程完全侵占或破坏，其保存现状基本完整时，经充分的科学论证，根据其文物价值，选择与原文物环境类似的新址对文物进行整体或局部搬迁；当文物整体将被工程完全侵占或破坏，但其保存现状残破或改动较大以致无法辨识原貌时，通过收集史料整理建档，详细测绘、拍照、记录，或拓片、制作模型，有条件地作出文物复原图，将有价值的构件拆落、收集和保存。

其他保护　水电站工程建设中，还应对基础设施、宗教设施和民族文化进行保护。对重要基础设施、宗教设施和民族文化遗产进行避让；无法避让的，必须按照“原标准、原规模、原功能”的原则进行恢复重建，并且在复建过程中，与区域社会经济发展和民族文化相结合，避免复建过程中的二次影响。

shehui huanjing yingxiang

社会环境影响　(impact on social environment)　水电站建设和运行过程中对工程所在区域人口、经济、人群健康、景观和文物等产生的影响。水电站工程的建设与运行对社会环境产生的影响有有利影响，也有不利影响，是水电站工程建设中重点关注的问题之一。

人口影响　工程建设期大量施工人员进入工程区；工程区占地及水库淹没带来居民迁移，形成新的城镇或居民点。地区人口分布和结构发生变化。

经济影响　工程建设期资金的大量投入，增加财税收入，提供就业机会，促进当地农副业、服务业发展，对当地经济发展起到了积极作用。工程建成运行后，库周交通条件和电力供应得到改善，促进当地工农业和第三产业发展，提高当地居民的生活水平。

人群健康影响　水电站的建设总体上改善了自然环境，使某些疾病发病率减少，有利于人身健康。由于工程地区环境特点和工程开发方式的不同，某些介水传染病的发病率可能增强或引起新的疾病输入。

景观文物影响　水库蓄水可能浸没或直接淹没风景、名胜、文物、古迹。水库建设也可以形成新的风景景观，发展旅游业，吸引游人。

其他影响　水电站工程建设过程中，可能因为施工占地和水库淹没，使道路、码头等基础设施和教堂、寺庙等宗教设施无法正常使用。

sheliu

射流　(jet flow)　从渠槽、挑坎或管道喷嘴以水股状泄出的水体，进入静止或流动着的水域或空气中的流动形态。是流体力学中自由紊流的一种类型。低速射流可能是*层流*型的，但实际工程中的水射流大多数属紊流型，如*冲击式水轮机*的喷嘴出流、自来水管的出流、喷灌设备的管嘴射流、消防水枪的射流、工业控制用射流元件的液体射流、*泄水建筑物*上的挑流水股、电站冷却水出流和环境工程中污水排放等。

无论是淹没射流或抛射于空气中的水股，都不受固体边界的约束，具有自由边界，在惯性力、重力、阻力、黏性力和表面张力的综合作用下，自由边界逐渐扩散。与此同时，射流水体与周围流体相互掺混，射流断面沿程递增，断面平均流速沿程递减，掺入射流的质量流则随之增加，但断面总动量沿程保持不变，遵循射流动量守恒原理。

射流的自由界面因黏性剪切作用而逐步扩散形成与外流的掺混流层，称为*射流边界层*。进入空气中的高速射流，自由边界的扩散常导致水流掺气，水股破碎，甚至水体雾化。

紊动射流理论是在射流动量扩散、热量扩散、混合物质量扩散等射流物质守恒条件和运动方程的基础上建立的，对于射流的研究，多限于二维（平面）情况或轴对称情况，而且多采用半经验的理论方法求解。

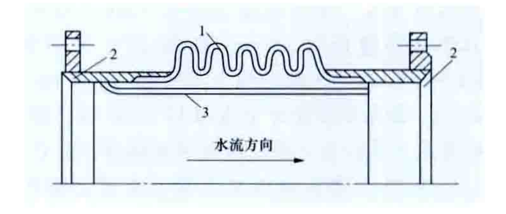
水电工程中的射流问题，主要是挑流消能有关内容，如：计算挑射水股的射程，以确定下游冲刷坑的位置；研究射流逐段（如坝面水流，空中水股，进入下游水垫后的流动）的消能率，从而估计河床被冲刷的深度；分析挑射水股回落至下游河道时的反弹和激起的水体形成的水雾，确定挑流雾化区范围，以便合理布置*水电站厂房*、出线和开关站。

shensuojie

伸缩节　(extension element)　压力钢管道上，具有能自由伸缩和微量角变位及良好密封性能的管段。装设在两镇墩间或厂房进水阀前，用以适应钢管因受温度影响产生的轴向位移和因建筑物不均匀沉陷等原因发生的角位移。

在*压力管道*两镇墩间，为便于管节自下而上地进行安装和减小上镇墩的轴向力，一般将伸缩节设置在上镇墩的下游侧。但当两镇墩间管轴线平缓时，也可将其设在管段的中部。

伸缩节的类型较多，有套筒式伸缩节、压盖式限位伸缩节、套筒式波纹全封闭式伸缩节、波纹管伸缩节等。常用的波纹管伸缩节有单式波纹伸缩节和复式波纹伸缩节。单式波纹伸缩节如图所示，它由一段波纹管、两个端接管和一个导流筒组成，核心部件波纹管由高性能的不锈钢薄板制作，具有较好的承压和补偿变形能力；复式波纹伸缩节由两段波纹管连接而成，它比单式波纹管多一段波纹管、一个导流筒及一个中间接管，具有较强的轴向、角向和横向补偿能力。



波纹管伸缩节构造图

1—波纹管；2—端接管；3—导流筒

伸缩节一般根据压力管道的变形要求，在工厂专门设计、制作，整体运往现场安装并进行压水试验。

Shenliuchuan Choushui Xuneng Dianzhan

神流川抽水蓄能电站　(Kannagawa Pumped Storage Power Station)　位于日本关东地区长野县东部信浓川水系支流南相木河和群马县西南部利根川水系交汇后的神流

川上，装机容量2820MW，是世界上装机容量最大的抽水蓄能电站。

枢纽布置 枢纽工程由上水库、下水库、泄水建筑物、水道系统、厂房等组成，见图。

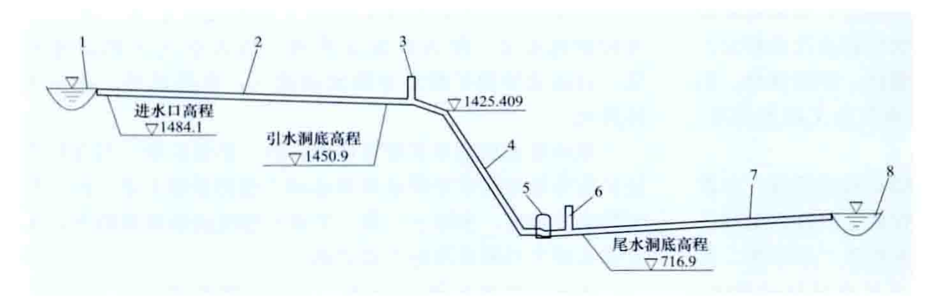


图2 神流川抽水蓄能电站纵剖面图

1—上水库；2—引水隧洞；3—上调压室；4—压力管道；5—地下厂房；6—尾水调压室；7—尾水隧洞；8—下水库

上水库 大坝为心墙堆石坝，坝高136m，坝顶长444m，上游面坝坡坡度为1∶2.7，下游面坝坡坡度为1∶2，坝体体积730万m^3，最高库水位1527.00m，相应库容1900万m^3。筑坝材料利用开挖弃料，心墙土料含水量采用石料场原拟弃掉的C_L级风化料进行调节。

下水库 大坝为碾压混凝土重力坝，坝高120m，坝顶长350m，上游面776.5m高程以下坝坡坡度为1∶0.1，下游面坝坡坡度为1∶0.84，坝体体积72万m^3。库容1800万m^3，最高库水位843.00m。每立方米混凝土掺用100kg水泥和粉煤灰。

泄水建筑物 上水库泄水建筑物位于左坝肩，采用侧槽式溢洪道，设计流量280m^3/s，陡槽后接消力池消能。考虑生态需要，下水库采用4套泄水设施，表孔溢洪道设计流量840m^3/s，一个底孔设计泄量52m^3/s，在坝上设一个流量为2.5m^3/s可伸缩的分层取水口，下游采用消力池。

水道系统 上、下水库均为侧式进/出水口。输水道总长约6350m。输水道分成两期，分别对应两个地下厂房。

一期输水道连接4台机组。上游引水隧洞长2445m，内径8.2m，最大流速6.3m/s。引水调压室为阻抗式，内径17m，高104m，阻抗孔直径4.6m。经上游调压室后分为两条压力管道。压力管道主管长1366～1388m，内径4.6m，其中斜井段长约960m，倾角48°，采用钢衬，最大流速10.2m/s。在下平段分成4条直径3～2.3m的支管，各长约100m。高压钢管和岔管采用HT-100级高强度钢材。尾水管依次由4条合为2条，再经尾水调压室后合为1条，内径为4.1～8.2m。尾水调压室为带上室式的阻抗式，直径10m，高126m，阻抗孔直径4.9m，上室长40m、宽13m、高15m。尾水隧洞直径8.2m，总长约2078m，全部用钢筋混凝土衬砌。

二期输水道连接二期厂房内的2台机组，在上游调压井和尾水调压井处不分岔，其余与一期输水道完全相同。上游引水隧洞长2475m，引、尾水隧洞主洞内径均为6.1m，最大流速5.8m/s。引水调压室为阻抗式，内径12m，高103m，阻抗孔直径3.3m。高压钢管厂1562m。尾水调压室形式同一期，直径7m，高138m，阻抗孔直径3.4m，上室长22m、宽10m、高14m。

厂房 地下厂房埋深500m，分为2座。一期厂房尺寸为215.9m×33m×53.6m（长×宽×高），安装4台机组，2台分裂变压器分别布置在厂房两端。副厂房位于主厂房右端，安装场布置在厂房中部。发电机安装高程726.8m，机组安装高程710.00m。二期厂房尺寸为139m×34m×55.3m（长×宽×高），安装2台机组。一台分裂式变压器布置在厂房左端，右端为安装场。两座厂房共用一条交通洞，为减少地面开挖，全部采用隧洞交通，总长超过5km。

6台单级可逆式水泵水轮机的单机容量为470MW，吸出高度−104m，最大和最小发电水头分别为675m和617m，额定水头653m，6台机引水流量510m^3/s，最大和最小抽水扬程分别为728m和677m。额定转速500r/min，最大飞逸转速755r/min。转轮直径4.385m，采用5个长叶片和5个短叶片。发电机出力525MV·A，抽水功率469MV·A，额定电压18kV，发电和抽水工况功率因数分别为0.9和0.95。主变压器容量1000MV·A。

工程施工 压力斜井采用全断面隧道掘进机开挖。厂房对外交通道路从位于下水库左岸的进厂交通洞洞口跨过水库库尾，再沿下水库右岸经大坝右坝头直至下游，并与已有公路连接，长度超过5km，大部分为隧洞。

工程于1997年5月开工，2005年12月首台机组发电，2010年第二台机组投入运行，预计2016年实现6台机组全部投入运行。

shenliu

渗流 (seepage)

流体在多孔或裂隙介质中的流动。事实上，渗流是一种假想的水流，这种假想水流具有下列性质：①通过任一断面流量与真实水流相等；②在某一断面水头和压力和真实水流一样。对水利水电工程，主要研究水在坝体、坝基和两岸的流动。渗流可造成水量损失；在土坝内形成浸润区；对混凝土闸、坝形成扬压力；还可能造成坝体和坝基的渗透破坏，引起两岸和下游地区的浸没，影响工程安全和正常运行。渗流研究的主要内容有工程地区的水文地质条件、渗透特性、渗流场分析、渗透变形、渗流控制和渗流监测（见土工原型观测）。

渗透性 水在不同土的孔隙中流动时受到不同阻力，或者说土的透水能力不同，这就是土的渗透性。1855年H.P.G.达西（H.P.G.Darcy，1803—1858）首先进行了均匀砂的渗透试验，发现渗透速度v和水力坡降i之间的线性关系$v=ki$，称为达西定律，i为水头h与渗径长度L的比值，比例常数k即渗透系数。达西定律适用于渗流的层流状态。试验和研究表明，除碎石、卵石等粗粒材料外，绝大多数土料在工程实用范围内可认为满足达西定律。渗透系数k的值可通过现场和室内试验测定。裂隙岩体的渗透性较复杂，根据裂隙分布规律和野外试验结果，在渗流场分析时可从宏观上视为各向同性或各向异性介质。

渗流场分析　其目的在于决定渗流场的水力要素，即水头 h、水力坡降 i、渗透速度 v 和渗流量 Q。对土体和水体均为不可压缩的情况，满足达西定律的稳定渗流分析可归结为求解拟调和方程

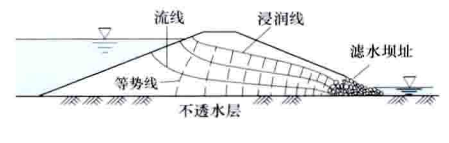
$$\frac{\partial}{\partial x}\left(k_x\frac{\partial h}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(k_y\frac{\partial h}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(k_z\frac{\partial h}{\partial z}\right)=0 \quad \text{（各向异性）}$$

或求解拉普拉斯方程

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 h}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 h}{\partial z^2}=0 \quad \text{（各向同性）}$$

少数情况可用数学分析方法获得以上方程的精确解，普遍采用数值分析方法（如有限单元法、有限差分法和边界元法等）求解。随时间改变的不稳定渗流，最常见的是水库水位下降时坝体的渗流自由表面下降情况，可分时段按稳定渗流和变自由表面边界求解。

对于各向同性的两向渗流，可以勾画等势线与流线正交的流网图（见图），并由水头函数 h 进一步决定各点的孔隙水压力、水力坡降、渗透力，计算渗流量和闸坝底部的扬压力。



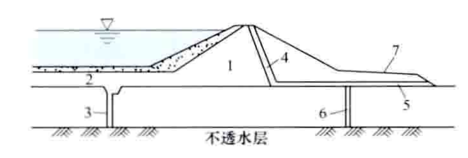
土坝渗流流网图

shenliu kongzhi

渗流控制

（seepage control）　为了减少渗漏量，降低土坝浸润线和混凝土闸、坝的扬压力，防止渗透破坏和控制两岸和下游浸没而采取的工程措施。包括坝体、坝基和两岸三个部分的渗流控制。基本方法分防渗和排水两大类。防渗方面有土石坝体的防渗斜墙和心墙、上游铺盖、坝基截水槽、混凝土防渗墙和灌浆帷幕等。排水方面有土质心墙和斜墙后的透水区、均质土坝的垂直排水、褥垫排水及坝基排水沟和减压井等。下图所示为控制土坝渗流的各种措施。大坝的各类渗流监测设备是检验渗流控制措施效果的重要手段，应视为大坝渗流控制的重要组成部分。

防渗　在地基或坝体中利用不透水或弱透水材料截断渗流或延长渗径，减少渗透流量，削减作用水头，以防止坝体和坝基的渗透破坏，并降低土坝坝体浸润线和混凝土结构承受的扬压力。



控制土坝渗流的措施布局示意图

1—弱透水区；2—防渗铺盖；3—截水墙；4—垂直排水；5—褥垫排水；6—减压井；7—盖重

（1）土石坝防渗体。有土质防渗体和人工材料防渗体两种，后者包括混凝土面板、沥青混凝土面板或心墙、土工薄膜等，可根据当地材料、气候、施工条件等选用。

（2）截水槽。在透水地基内挖槽，并用弱透水材料回填。除特别缺水的地区及对渗漏要求较高的情况外，用渗透系数 $k<1\times10^{-5}$ cm/s 的土料回填均能满足防渗要求。但需要做好下游反滤层以及与基岩的结合处理，以保持渗透稳定。

（3）上游铺盖。沿透水地基表面用防渗土料铺设的水平覆盖层，是地基水平防渗的一种措施，其末端与坝的斜墙或心墙相连接，渗透系数应满足 $k\leqslant1\times10^{-5}$ cm/s 的要求，而且至少小于地基土层的渗透系数的 1/100。在坝前的水平长度应在考虑铺盖的有效长度后确定。铺盖与地基的结合面应满足反滤要求。铺盖削减水头有一定限度，故往往与坝下游的反滤排水结合使用。

（4）混凝土防渗墙。（见软基处理）

（5）灌浆。（见灌浆）

排水　一种疏导的方法，将透水性良好的材料有计划地预先置于适当部位，使渗透水流提前释放压力或改变方向，并顺利和无害地排向下游，以保证建筑物的安全。排水设施中反滤层是其主要组成部分，它使排水设施不仅能排水减压，同时能防止渗透变形，成为渗流控制中极其重要的措施。①均质坝常在坝体中设置一道垂直排水，并与底部的褥垫排水相衔接，截住通过坝体的渗流，使下游部分坝体保持干燥状态，有利于坝体稳定，见图。②土石坝心墙或斜墙下游面的反滤层实际上也起排水作用，能有效地控制通过防渗体的渗流，防止各种类型的渗透变形。③对透水层上部有不透水或弱透水层覆盖的双层地基，常因形成承压水而使下游溢出处地基发生流土破坏，可以采用减压沟、井降低承压水头或加透水盖重解决，见图。④在混凝土坝岩基内设置排水幕（常设置于灌浆帷幕之后）以及在坝与基岩接触面的下游部分设置排水垫层，是降低扬压力的最有效方法。

shentou bianxing

渗透变形

（seepage deformation）　由于渗流引起土体或土颗粒移动而导致的土体变形。土体的渗透变形形式通常归纳为管涌、流土、接触流失和接触冲刷 4 种。它与地质条件、土的性质、颗粒组成及结构、水力条件和渗流出口的保护条件等因素有关。对单一土层结构，主要是管涌和流土，对双层结构土层或土层与建筑物（或岩体）界面处主要是接触流失和接触冲刷。在实际工程中，首先要判别渗透变形的可能形式，然后确定其抗渗强度，并采取必要的防护措施。

渗透变形形式　主要有：①管涌，指颗粒骨架间的孔隙中细颗粒被渗透水流移动和带出的现象。若在某一水力比降（作用水头和渗径长度的比值）下，这种现象连续发展，而且渗透系数增大，则称为发展性管涌；若增大水力比降后带出一些细颗粒，随后又停止，渗透系数也不增大，则称为非发展性管涌。管涌常发生在颗粒组成很不均匀的砂砾石中。②流土，指土体局部或整体隆起、浮动和流失的现象，常发生在较均匀的砂土或黏性土的渗流溢出面上，随后向深部发展。③接触流失，指两种不同粒径的相邻土层接触面处，由于垂直层面的渗流使较细土层中的土粒向相邻较粗土层孔隙中流失的现象。④接触冲刷，指渗流沿两种不同粒径的相邻土层或土层与混凝土建筑物（或岩体）界面带走细颗粒的现象。

判别方法　试验是判别渗透变形形式和确定抗渗强度的有效方法。试验研究表明，黏性土及不均匀系数 $C_u<$

(5～10）的无黏性土，渗透变形形式主要是流土；$C_u>10$ 的无黏性土，渗透变形形式主要取决于细粒含量 p。$p>35\%$时为流土；$p<35\%$时为管涌，其中 $p<25\%$时为发展性管涌，$p=(25\%\sim35\%)$ 时为非发展性管涌，最后破坏形式主要决定于土的密度与结构，可能是流土，也可能转化为发展性管涌。对于双层地基，当细粒土的 $C_u<10$，且 $D_{10}/d_{10}\leqslant10$ 时，一般不会发生接触冲刷；两层间满足反滤要求时不会发生接触流失。D_{10} 和 d_{10} 分别为粗粒土层和细粒土层的特征粒径，小于该粒径的土粒重为总土重的 10%。

抗渗强度　土体抵抗渗透破坏的能力，以临界水力坡降（亦称破坏水力坡降）i_f 表示。流土的 i_f 值可按动水压力和土的浮质量平衡的原理，由下式确定

$$i_f=\frac{\gamma'}{\gamma_w}=(G_s-1)(1-n)$$

式中 γ' 为土体浮容重；γ_w 为水的重度；G_s 为土粒比重；n 为孔隙率。管涌土的破坏水力坡降可用试验方法确定，或用经验公式作初步评价。土体的抗渗强度还与渗流出口的防护条件有关，反滤层可提高土体的管涌破坏比降，反滤层及透水盖重可使被保护土体免于流土破坏。

shengchuanji

升船机　(ship lift)

将装载于承船厢内或承船车上的船舶，沿倾斜或垂直方向升降而运送过坝的机械设备。与船闸相比，其金属结构及机电设备较为复杂，但具有不耗水、水位变化适应性好、船舶过坝历时短、通过速度快的优点。

分类　按装载船舶的承船厢（车）的运行路线，可分为垂直升船机和斜面升船机两大类。垂直升船机又可分为均衡式垂直升船机和浮筒式垂直升船机，其中多采用均衡式垂直升船机。斜面升船机又可分为纵向斜面升船机和横向斜面升船机。此外，还有水坡式升船机。

按承船厢（车）载运船舶的方式，可分为湿运和干运两大类；按承船厢（车）是否下水，又可分为下水式和不下水式两种。

垂直升船机　一般由上下游引航道、上下闸首及挡水设备、塔柱、承船厢及设备、主提升机或升降驱动机构、平衡系统、安全装置、电力拖动及控制系统等部分组成。世界上垂直升船机的代表性机型有钢丝绳卷扬提升式和齿轮齿条爬升式两种。比利时斯特勒比·蒂厄（Strepy Thieu）升船机，中国红水河岩滩、闽江水口、清江隔河岩和高坝洲升船机均为钢丝绳卷扬提升式机型；德国尼德芬诺和吕内堡升船机，中国长江三峡、金沙江向家坝升船机则为齿轮齿条爬升式机型。这些升船机的规模都在 250t 级以上，均采用湿运平衡重式方案，与不设置平衡重的干运方式相比，具有驱动功率小、能耗低、运行费用省的优点。两种机型均设有可靠的安全保障机构，使升船机运行具有足够的安全性。表 1 列出了中国部分已建、在建的大型垂直升船机。某工程垂直升船机纵剖面见图 1。

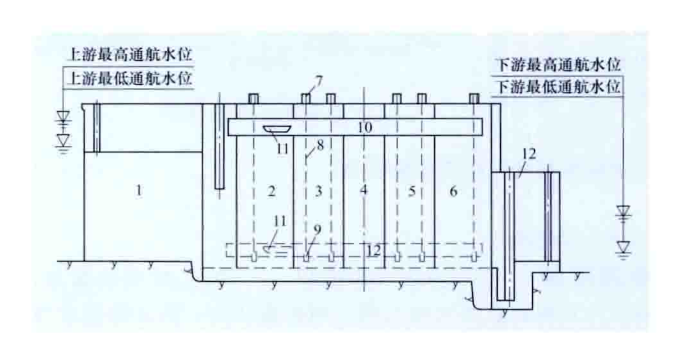


图 1　垂直升船机纵剖面示意图

1—上闸首；2—上提升段；3—上平衡重段；4—交通楼梯段；5—下平衡重段；6—下提升段；7—卷筒；8—钢丝绳；9—平衡重；10—承船厢；11—船舶；12—下闸首

表 1　中国部分已建、在建大型垂直升船机概况

序号	国别	名称	型　式	提升高度（m）	最大过船吨位（t）	建成年代
1	中国	岩　滩	钢丝绳卷扬提升平衡重式、船厢下水	68.5	250	2000
2	中国	水　口	全平衡钢丝绳卷扬提升式	59	2×500	2003
3	中国	隔河岩	二级全平衡钢丝绳卷扬提升式	40+82	300	2007
4	中国	高坝洲	全平衡钢丝绳卷扬提升式	40.3	300	2007
5	中国	彭　水	全平衡钢丝绳卷扬提升式	66.6	500	2011
6	中国	三　峡	全平衡钢丝绳卷扬提升式、长螺母短螺杆安全机构	113	3000	在建
7	中国	向家坝	全平衡钢丝绳卷扬提升式、长螺母短螺杆安全机构	114.2	2×500 兼顾 1000	在建

斜面升船机　一般由上下游引航道、斜坡道与过峰装置、斜架车、牵引设备、电力拖动及控制系统等部分组成。已建斜面升船机的结构形式有高低轮式、摇架式、转盘式、岔道式、双层车式、链杆变腿车式和自平式等。其中以高低轮式应用较多，它利用承船车上设有不同轮距及不同高度的两组行走轮，每一组行走轮分高轮和低轮，在相应轨距的轨道上行驶，以保持承船车上的船只处于水平位置。从布置选型来说，若上下游整体线路为一直线时，一般选用高低轮式、摇架式或链杆变腿车式；若上下游整体线路为一折线，可选用转盘式或岔道式；若上下游线路间有较长的顶部水平段时，可选用双层车式。大型斜面式升船机，一般宜采用下部为斜架车、上部为承船厢的湿运式方案。

简史　中国早在三国时期已出现利用人力或畜力沿斜坡拖船过坝的设施，历代亦多有建造，称“埭”、“堰埭”或“车船坝”，实为斜面升船机的原始形式。公元前 600 年，古希腊已有利用斜坡拖船上岸，运过科林斯地峡的实例。

中国从 20 世纪 50 年代开始，已相继建成各类升船机数十座，分布于多省区。其中 1973 年建成的丹江口水利枢纽的两级 150（减载 300）t 级升船机，上游为可移动的钢丝绳卷扬提升式垂直升船机，提升高度 35.3m，下游为双向斜面升船机，提升高度 34m。90 年代以来，中国成功建造岩滩、水口、隔河岩两级等 6 座钢丝绳卷扬提升式垂直升船机。长江三峡垂直升船机、金沙江向家坝垂直升船机正在建设中，其中长江三峡垂直升船机，提升高度达 113m，提升重量达 15 500t，可通过 3000t 的大型客、货轮，见图 2。构皮滩三级垂直升船机的规模也居世界前列，总提升高度 199m，中间级升船机的提升高度达 127m，为世界第一。国外已建大型升船机概况见表 2。



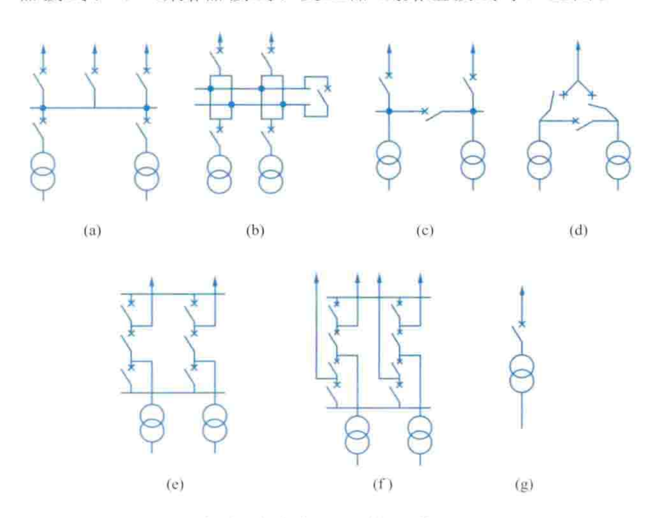
图 2　三峡水电站升船机工程

表 2　国外已建大型升船机概况

序号	国别	升船机名称	型　式	提升高度（m）	最大过船吨位（t）	建成年份
1	德　国	尼德芬诺（Niederfinow）	平衡重式垂直升船机	36.0	1000	1934
2	德　国	罗腾塞（Rothensee）	浮筒式垂直升船机	18.7	1000	1938
3	德　国	亨利兴堡（Henrichenburg Waltrop）	浮筒式垂直升船机	13.7	1350	1962
4	比利时	隆库尔（Ronquieres）	纵向斜面升船机，坡度 1∶20	67.5	1350	1967
5	法　国	阿尔泽维勒（Arzviller）	横向斜面升船机，坡度 1∶25	44.5	350	1970
6	苏　联	克拉斯诺雅尔斯克（Krasnojarsk）	自行式纵向斜面升船机，坡度 1∶10	101.0	2000	1984
7	法　国	蒙泰施（Montech）	水坡式升船机，坡度 1∶33	14.3	350	1973
8	德　国	吕内堡（Lüneburg）	双线平衡重式垂直升船机	38.0	1350	1975
9	法　国	枫斯拉诺斯（Fonserannes）	水坡式升船机，坡度 1∶20	13.6	350	1983
10	比利时	斯特勒比·蒂厄（Strepy Thieu）	平衡重式垂直升船机	73.0	1350	2001

shenggaodianyace jiexian

升高电压侧接线　（electrical connection on high voltage side）　变压器、高压配电装置和架空线路之间连接的电路。表明水电站高压侧的变压器、断路器、隔离开关、导体（母线或电缆）等主要电气设备的连接。常用的接线有单母线接线、双母线接线、桥形接线、角形接线、3/2 断路器接线、4/3 断路器接线、变压器-线路组接线等，见图。



各类升高电压侧接线简图

(a) 单母线接线；(b) 双母线接线；(c) 桥形接线；(d) 角形接线；(e) 3/2 断路器接线；(f) 4/3 断路器接线；(g) 变压器-线路组接线

单母线接线　电源和出线回路都经断路器和隔离开关连接在一组汇流母线上，用于完成电站全部电能的汇集和分配。常用的接线方式有单母线接线、单母线隔离开关或断路器分段接线、单母线带旁路母线接线以及单母线分段出线带旁路隔离开关接线。

双母线接线　有两组经母线联络断路器相连的汇流母线，各回路经一组断路器和两组母线隔离开关接至任一组母线的接线方式。两组母线经常同时工作，并可通过母线联络断路器并联运行。常用的接线方式有双母线接线和双母线带旁路母线接线两种，后一种接线中有母线联络与旁路母线共用一组断路器的，也有设专用旁路断路器的。

桥形接线　两组变压器-线路组接线之间用一台断路器作为连接桥的接线方式。按连接桥断路器的位置，可分为外桥、内桥、双外桥和双内桥等 4 种接线。

角形接线　各断路器互相连接而成的闭合的环形电路，也称环形接线。在每两台断路器之间引出一条回路，角形接线既实现了双重连接的原则，使每一回路有两台断路器，具有双断路器的功能，又使断路器数量等于进、出线回路数，具有设备少、投资省的优点。在角数不多的情况下，具有较高的可靠性和灵活性。水电站常用的接线方式有三角形接线、四角形接线和五角形接线。

3/2 断路器接线　每 2 回进出线接 3 台断路器与 2 条母线连接的接线方式，也称一倍半接线或一个半接线。3/2 断路器接线是大型水电站应用较多的一种接线，一般适用于对

供电可靠性要求较高、出线电压在500kV及以上的大型水电站。

4/3断路器接线　每3回进出线接4台断路器与2条母线连接的接线方式。此种接线与3/2断路器接线类似，与3/2断路器接线相比，可靠性略高，可以节约断路器数量，节省投资。一般适用于对供电可靠性要求较高、出线电压在500kV及以上、进出线回路数较多的大型水电站。在进、出线回路数大体成2∶1或1∶2的情况下较为适宜。

变压器-线路组接线　变压器和线路串联连接的接线方式。一般在主变压器高压侧装有断路器；也有高压侧不设断路器的，但要考虑发电机或变压器内部故障时能迅速切断线路对侧断路器。这种接线适用于：①没有近区负荷，将电能集中送至离电站较近的枢纽变电站或距离较近的梯级水电站联合开关站的电站；②只有一台变压器和一回出线的电站；③电站初期发电时的过渡接线。

shengtai diaodu

生态调度

（flow regulation for ecology）　将生态环境需求因素纳入水电工程调度计划或规程中，在兼顾防洪、发电、供水、灌溉、航运等水资源多目标利用的同时，对河流生态系统不利影响采取弥补或减缓措施的水库调度方法。水电站的生态调度主要包括生态环境需水调度、生态洪水调度、泥沙调度、水质调度、生态因子调度、综合调度等。

生态环境需水调度　以满足河流生态需水为目的，保持河流具有一定的水量，防止河流断流和河道萎缩，维持河流水生生物繁衍生存。生态环境需水调度还需要综合考虑维持与河流连接的湖泊、湿地的基本功能，维持河口生态和防止咸潮入侵所需的水量。

生态洪水调度　为河流重要生物繁殖、产卵和生长创造适宜的水文学和水力学条件，模拟自然水文情势的水库泄流过程。如根据鱼类繁殖的生物学习性，结合来水的水文情势，通过合理控制水库下泄流量过程，为鱼类产卵创造水动力条件。

泥沙调度　水库按“蓄清排浑”、调整泄流方式以及控制下泄流量等方法，通过调整出库水流的含沙量和流量过程，增加库区泥沙吸附的营养物质向坝下的输移，降低下游河道冲刷强度。

水质调度　为防止水库水体的富营养化，可以通过改变水库的调度运行方式，在一定时段降低坝前蓄水位，加大水库下泄量，缓和库岔、库湾水位顶托的压力，带动库区内水体的流动，加大缓流区的水体流速，破坏水体富营养化条件，防止水体富营养化。利用水库调度对水资源配置的功能，蓄丰补枯，增加枯水期泄放水量，提高下游河道水环境容量，改善水质。

生态因子调度　通过水库调度对单项的水温、流速、流量等生态因子进行调整，以适应下游水生态环境的需求。以水温为例，根据大型水库水温垂直分布结构，结合取水用途和下游河段水生生物学特性，通过下泄方式的调整，提高下泄水的水温，满足坝下游水生动物产卵、繁殖的需求。

综合调度　根据具体水电工程运行与管理中的特点和实际，实施包含以上各项或几项的综合优化调度。

参考书目

陈进．中国环境流研究与实践．北京：中国水利水电出版社，2011.

shengtai liuliang

生态流量

（ecological flow）　在水电站水库蓄水和运行调度过程中，为维持坝址下游天然河流的生态系统及功能，满足其时空分布需求的水量。引水式和混合式电站引水发电以及堤坝式电站调峰运行将使坝下河段减（脱）水，水文情势的变化将对水生生态、生产和生活用水、河道景观等产生一系列不利影响。为维护河流的基本生态需求，水电站工程需下泄一定的生态流量。

河道生态用水需要满足的各项要求包括：河道外植被生态需水量、维持水生生态系统稳定所需水量、维持河流水环境质量的最小稀释净化水量、河道内输沙需水量、河道蒸发需水量。

水电站生态流量下泄及控制可采取的工程措施有：①承担基荷发电任务，通过电站本身发电下泄生态流量；②在枢纽布置中单独设置生态流量泄放设施；③结合工程本身引水、泄流设施，泄放生态流量；④建立下泄流量自动测报和信息远程传输系统。

shengtai xiufu

生态修复

（ecological remediation）　依靠人工措施，辅以生态系统的自我调节能力与恢复能力，对受水电工程建设影响的陆生生态系统逐步恢复其原有功能。水电工程施工结束后，结合水土保持植物措施，将工程临时占地区域受损生态系统进行科学合理的设计，采用人工抚育和生态系统自我恢复的方法，逐步恢复施工占地区域原有的生态系统功能。

生态修复目标　对工程区域生态现状进行调查和分析，明确工程区域主要的生态系统类型及其结构和功能特征，结合水电站工程枢纽总布置和施工总布置确定生态修复方向和目标。

生态修复分区　根据生态修复方向和功能定位，可将施工占地区域按照原有生态系统功能进行分区，可分为生态保护区、经济林区、农耕区、电站景观绿化区等。

生态修复方法　生态修复初期，主要靠人工修复，对生态修复区域水、土等主要立地条件进行改造，同时做好封禁、防火、防病虫等，人工栽植先锋物种、优势种和伴生种；生态修复后期可发挥生态系统的自我修复能力，让其进行自我修复。工程建设的扰动或破坏，原有立地条件较差，工程施工结束后，对生态系统服务价值中的水土保持效益影响最大。生态修复先考虑满足保持水土的生态效益，随着立地条件的改善，逐步配置相应的树种，达到生态修复的综合效益。

参考书目

任海，刘庆，李凌浩．恢复生态学导论．北京：科学出版社，2008.

shigong celiang

施工测量

（construction survey）　为使工程建设按设计要求施工所进行的控制、放样和竣工验收等的测量工

作。目的是将图纸上设计的建筑物的平面位置、大小、形状和高程标定在施工现场的地面上，并指导施工，使工程严格按照设计的要求进行建设。水电工程施工测量包括施工控制测量、施工放样、竣工测量、施工期变形观测等。

施工控制测量　根据勘测设计部门提供的测量控制点，先在整个建筑场区建立统一的施工控制网，作为后续建筑物定位放样的依据。施工控制网比测图控制网在点位分布、密度、精度和可靠性等方面均有更高的要求，一般应进行专项的技术设计。施工控制网包括施工平面控制网和施工高程控制网。施工控制网高程系统应与规划设计阶段应用的高程系统相一致。施工平面坐标系统若与规划设计阶段不一致，应建立换算关系。当施工控制网的精度不能满足施工中某些局部工程高精度要求的平面放样时，可根据施工控制网的某点坐标和一条边的方位为依据，布设局部独立控制网。施工控制网的边长应投影在建筑物的基准高程面（或平均高程面）上。当施工控制网边长投影面与原测图控制网的边长投影面相差较大时，应进行必要的坐标联测，然后进行坐标拟合，以确保原有测图不致因坐标系统不一而产生偏移。

施工放样　将设计建筑物的平面位置和高程精确地标定在实地的测量工作，为后续的工程施工和设备安装提供诸如方向、标高、平面位置等各种施工标志，确保按图施工。水电工程施工放样内容有：枢纽建筑物、辅助工程建筑物、临时工程建筑物、移民安置工程等施工放样。为了正确放样，应根据设计图件、有关文件数据与测量控制网成果，提前标出放样数据，绘出放样草图，并设计验核条件与方法，以便现场放样与检验。平面位置放样的方法主要有交会法、电磁波测距极坐标法、导线法和全球导航卫星系统（GNSS）测量法等，高程位置放样的方法有几何直接水准法、电磁波三角高程法和GNSS高程测量法等。

竣工测量　在工程各项、各分项、各分部工程施工之后，进行竣工验收测量，检查施工是否符合设计要求，并可作为工程量计算的依据。竣工测量包括测绘竣工地形图和断面图、建筑物体形测量、过流部位体形测量、枢纽平面与高程控制成果、外部变形观测设施竣工图和外部变形观测资料。

施工期变形观测　在工程施工期间，对工程主体建筑物和辅助建筑物及其地基或一定范围内的岩体及土体滑坡或高边坡的位移、沉降、倾斜、挠度、裂缝等埋设工作基点和观测设备，进行周期性重复观测工作，确保它们在施工和使用期间的安全。大中型水电工程根据设计按工程进度及时埋设垂直与水平位移观测工作基点和测点、正（倒）垂线、激光准直、引张线、静力水准、连通管及固结观测的横梁式固结管或深式标组等观测设施，并在施工期间开始进行观测。水电工程若遇洪水、地震等情况，应加密测次，为建筑物在蓄水前积累观测资料。为了使观测资料具有连续性，变形监测基准应与永久性变形监测一并考虑，进行统一的变形观测专项设计，避免由于基准不同给资料分析带来麻烦。

shigong changnei jiaotong

施工场内交通

(jobsite transportation for construction)　施工期间衔接施工对外交通，联系工地内部各工区、料场、堆弃渣场、各生产生活区之间的交通运输线路。施工场内交通线路结合地形、地质条件和施工总布置协调规划，一般在施工筹建、准备期施工完成，多以公路作为主要的交通方式。公路运输适应性强、机动灵活、投资省、建设工期短，在不同施工期可以根据需要采用不同标准和技术要求，以适应施工需要。通常，交通量大和运输特别繁忙的场内交通干线都要避开生活区，减少与场内铁路或其他道路的交叉；对运输强度高和行车密度大的交通干线，常布置成环行线。

根据不同用途，场内交通通常设置有上坝路、进厂路、截流路、出渣路、运料线、混凝土进料线、过坝路、场内连接路等线路及跨河设施。

上坝路　至坝顶的道路。施工期作为坝肩开挖和混凝土浇筑运料的交通干线道路，施工结束后作为永久上坝交通道路。

进厂路　进入厂房安装间的道路。施工期作为厂房开挖、混凝土浇筑运料和机电设备运输的交通干线道路，施工结束后作为永久进厂交通道路。

截流路　自截流材料备料场至截流戗堤的交通道路。施工截流是控制总工期的关键项目，因此，截流路要适应截流时各种重型车辆设备和重件的特殊运输要求，其特点是路面宽、行车密度高、承能力大，能适应截流合龙时各种重型车辆设备和重件的特殊运输要求。

出渣路　地面或地下工程开挖出渣的临时运输道路。通常是控制地面或地下工程出渣强度的关键项目，根据施工方法和运输设备、开挖运输强度等进行布置。在单头掘进长度较长的中、小断面隧洞工程开挖出渣中，也常采用电瓶机车牵引梭式矿车的窄轨运输方式，相应要求出渣路的坡度一般缓于2%。

运料线　用于运输筑坝土石料或混凝土骨料的道路，是控制筑坝强度的重要环节。其标准根据运输机械、运输强度和地形、地质条件选定，运输方式除公路外，也可采用铁路、连续运输的带式输送机或架空索道等方式。

混凝土进料线　混凝土坝施工中运送混凝土拌合物的专用道路。除公路外，也常采用轨道运输从拌和楼将混凝土拌合物运至坝址，一般在坝址设混凝土运输栈桥或缆索式起重机，将混凝土垂直提升运送入仓。

过坝路　为连接因坝肩开挖而中断的坝址上、下游交通而设置的道路。通常有过坝交通隧洞或明线道路，但有时在通航河道常设临时过坝措施，如升船设施，形成特殊的过坝交通线。

场内连接路　为解决各施工区之间及生产、生活区的人员交通，料物、设备的储存、中转、集散，以及消防、救护等设置的交通线路。一般根据不同物资运量、运输强度、运载工具和使用时间等因素，选择不同技术标准和材料、结构进行设计。

跨河设施　水电站工地沟通河道两岸的交通设施。一般包括桥梁和渡口，多选在坝址下游河道顺直、岸坡稳定、两岸有适当滩地且不影响坝体和厂房施工的位置。电站竣工后不拆除的桥梁，还要考虑对电站尾水的影响。

shigong daoliu

施工导流

(construction diversion)　为在河道中修建水工建筑物，围护基坑，引导河水下泄，创造干地施工

条件的临时性工程措施。基坑是由围堰所围出的一个与水流隔开的施工场地。排除基坑中积水后，就可形成干地施工条件。按不同的施工导流方式，围堰或拦断全部河道，或围护河道的一部分。前者河水通过预先建成的导流泄水建筑物所形成的通道下泄；后者河水通过堰外的原河道下泄。导流建筑物包括导流挡水建筑物及导流泄水建筑物，导流挡水建筑物一般为围堰，导流泄水建筑物主要有隧洞、明渠、底孔、涵管、缺口等。施工导流改变了河道的正常状态，因而在施工导流期间，应解决河岸防护、排沙、排冰、下游供水和施工期通航等问题。

导流阶段划分　包括初期导流、主体建筑物临时挡水和后期导流3个阶段。

(1) 初期导流。主要指围堰挡水阶段，即从河道截流到主体建筑物具备一定的挡水和泄水能力之前的阶段。在这期间，主体工程完全在围堰保护下施工。如果采用过水围堰，汛期基坑过水，主体工程被淹没的部位停止施工，直到汛期结束，基坑排水后方能恢复施工。

(2) 主体建筑物临时挡水。从全部或部分主体建筑物达到一定的临时挡水高程时起，直到导流泄水建筑物开始下闸封堵和水库开始蓄水前为止。

(3) 后期导流。主要指施工蓄水阶段，即各导流泄水建筑物相继下闸或封堵，水库全面蓄水，机组相继投产发电。蓄水期间需要向下游泄放城镇、农业、航运、生态和下游电站等用水要求的水量。对利用围堰提前蓄水发电的工程，发电初期仍为围堰挡水。

导流方式　有断流围堰导流和分期围堰导流两种基本方式。导流方式选择要根据坝址地形地质条件、河道情况、主体建筑物特点、当前施工技术水平等综合分析决定，是水电工程施工的关键问题之一。

(1) 断流围堰导流。较适用于窄河床工程，特别对土石坝、拱坝等要求整体平起不宜分期施工的工程常采用这种导流方式。一般是先在岸边修建明渠或开挖隧洞，或在河床中布置涵管等导流泄水建筑物，然后在拟建的主体建筑物上、下游横河修建围堰，全面截断天然河道的水流，迫使河水改道下泄。主体建筑物在上、下游围堰围出的基坑中施工。(见断流围堰导流)

(2) 分期围堰导流。较适用于宽河床、大流量的情况。一般先靠一岸修建上、下游横向围堰及顺河纵向围堰构成第一期施工基坑。水流由基坑外束窄的河道下泄。当一期基坑的主体工程达到一定的挡水能力，并且为后期工程施工用的导流泄水建筑物也已经建成时，即可拆除一期围堰，改围另一侧河床，使水流由前期预先建成的导流泄水建筑物下泄，再进行后期主体工程施工，前期基坑中的主体工程或者继续施工，或者全部（或部分）投入运用。当主体工程具备挡水、蓄水及泄水能力后，即封堵导流泄水建筑物，进入施工导流第三阶段。(见分期围堰导流)

洪水设计标准　一般包括施工导流建筑物的洪水设计标准、坝体施工期临时度汛洪水设计标准、导流泄水建筑物封堵后坝体度汛洪水设计标准等，各国的具体规定不同。DL/T 5397—2007《水电工程施工组织设计规范》对导流工程的洪水标准规定为：

(1) 施工导流建筑物的洪水设计标准。根据施工导流建筑物的结构类型和级别确定其洪水标准。导流建筑物级别划分见表1，导流建筑物洪水设计标准见表2。

表1　导流建筑物级别划分

建筑物级别	保护对象	失事后果	使用年限（年）	围堰工程规模	
				高度（m）	库容（亿 m³）
3	有特殊要求的1级永久建筑物	淹没重要城镇、工矿企业、交通干线，或推迟总工期及第一台（批）机组发电工期，造成重大灾害和损失	>3	>50	>1.0
4	1、2级永久建筑物	淹没一般城镇、工矿企业，或影响总工期及第一台（批）机组发电工期，造成较大损失	2～3	15～50	0.1～1.0
5	3、4级永久建筑物	淹没基坑，但对总工期及第一台（批）机组发电工期影响不大，经济损失较小	<2	<15	<0.1

注：导流建筑物根据其保护对象、失事后果、使用年限和工程规模划分为表中的3～5级。

表2　导流建筑物洪水设计标准［年（重现期）］

导流建筑物结构类型	导流建筑物级别		
	3	4	5
土　石	50～20	20～10	10～5
混凝土浆砌石	20～10	10～5	5～3

洪水标准确定后，导流的设计流量值取决于导流时段的选择。有些河道洪枯流量相差极大，同标准的洪水期流量可能是枯水期流量的十余倍乃至几十倍。为了减小导流泄水建筑物的规模，在初期导流阶段不采用基坑全年施工，而是通过导流方案和主体工程施工方法、施工程序、施工进度的研究，选择适宜的基坑施工时段，既能满足主体建筑物施工的工期要求，又能减小导流时设计洪水流量，从而减少施工导流工程量。

(2) 坝体建筑物施工期临时度汛洪水设计标准。当坝体筑高到超过围堰顶部高程时，就由它自身临时挡水，称为坝体施工期临时度汛阶段，该阶段的洪水设计标准见表3。

表3　坝体施工期临时度汛洪水设计标准［年（重现期）］

坝　型	拦蓄库容（亿 m³）			
	>10.0	10.0～1.0	1.0～0.1	<0.1
土坝堆石坝	≥200	200～100	100～50	50～20
混凝土坝浆砌石坝	≥100	100～50	50～20	20～10

（3）导流泄水建筑物封堵后坝体度汛洪水设计标准。永久泄洪建筑物尚未具备设计泄洪能力，坝体进入拦洪、蓄水阶段。此时要求坝体修建的高度超过施工期间同期的设计拦洪及蓄水水位，其帷幕灌浆及接缝灌浆高程也应能满足蓄水要求。导流泄水建筑物封堵后坝体度汛洪水设计标准见表4。

表4 导流泄水建筑物封堵后坝体度汛洪水设计标准［年（重现期）］

坝型		大坝级别		
		1	2	3
混凝土坝 浆砌石坝	正常运用洪水	200～100	100～50	50～20
	非常运用洪水	500～200	200～100	100～50
土石坝	正常运用洪水	500～200	200～100	100～50
	非常运用洪水	1000～500	500～200	200～100

导流工程施工 施工导流贯穿于整个工程的施工过程。第一阶段导流工程施工程序是先建成导流泄水建筑物（如隧洞、明渠、涵管或利用原河床导流），然后截流、建成主体工程围堰。围堰一般安排在枯水初期小流量时开始施工。围堰种类和施工方法非常多，对于横向土石围堰多数是先修戗堤。戗堤是用石渣等颗粒体材料由岸边用进占法向河心堆筑的透水堤。戗堤堆出水面并在龙口合龙后（见截流），在其临水面铺筑防渗材料止漏，称为围堰闭气。对围堰基础的覆盖层，需要加宽戗堤形成施工平台，进行基础防渗处理。此后继续加高培厚，直到围堰完成。横向围堰的另一种施工方法是先修一个低围堰挡水，在它的保护下再修建工程需要的高围堰或过水围堰。分期导流的纵向主围堰一般是前、后期共用，穿越主体建筑物的部位，要与主体建筑物结合。纵向围堰位置如果是在水中，一般要先修一道小围堰挡水，在它的保护下修建纵向围堰。分期导流一般须先在一期工程中修建好导流泄水建筑物，拆除一期上、下游横向围堰后才能进行二期截流。

第二阶段一般利用主体建筑物挡水度汛，施工重点是所利用的主体建筑物要达到防洪度汛形象要求。当采用导流底孔或缺口参与度汛时，还应完成导流底孔、缺口及下游消能防冲措施的施工。

第三阶段的施工任务是在满足后期导流和下游供水要求的前提下，选择导流泄水建筑物的封堵时间，完成封堵或改建。

shigong duiwai jiaotong

施工对外交通 （construction access） 从已建铁路站场（物资转运站）、城镇或港口码头运输物资、设备、人员至施工工地的交通。它是施工工地与外部联系的主要交通线路，其运输能力应能满足工地施工高峰期物资的运输要求，且应安全可靠、中转环节少、运输损耗低、运输费用省。交通运输方式有公路运输、铁路运输、水路运输和航空运输四类。

公路运输 水电工程建设施工的主要对外交通方式，一般由专用对外公路，部分专用、部分利用当地已有交通或改扩建而成。专用公路选线时，要结合外来物资流向、地区交通规划和经济发展要求决定线路走向，并尽量利用当地已有公路、桥梁、隧道等设施。在满足工程施工期高峰运输强度的前提下，还需考虑水电工程特有的超限、超重件的运输措施。通常在外来物资运输方式变换地点设置物资转运站，且都在铁路站场或港口码头附近，设置仓库、料棚、堆场、管理和生活用房，以及必要的起重堆运设备等。转运站规模根据物资来源、种类和到货情况确定。以公路作施工对外交通，能适应复杂的地形、地质条件，具有方便、灵活、投资少、工期短的特点，可以独立完成水电工程施工的运输任务，是水电工程施工优先采用的对外运输方式，其适应范围自数十公里至数百公里不等。但公路要经常维修保养，单位运价较高。

对外交通专用公路施工期一般由项目业主进行管理，工程施工完成后作为电站的永久交通使用，交由地方交通部门管理。

铁路运输 铁路专用线已很少采用。由于铁路建设要求技术标准较高、运行管理复杂、建设周期长、建设投资大、占地多，且零星器材、紧急物资以及人员往返常因受铁路调度限制，一般不能单独承担全部对外交通任务，仍需公路配合。

水路运输 在原有通航河道上加设专用码头或改善河道航运能力，以满足工地对外交通要求。一般在有水运条件的工地均要充分利用。但河道航运能力往往受季节影响较大，因此，虽然水运与其他对外交通方式比较，运输能力大、单位运价低、需增加的建设投资省，但在水电工程施工中除特殊情况外，一般只作为辅助对外交通线。

航空运输 只在偏僻山区、采用其他运输方式不经济、工地急需某种器材设备或抢救伤员时才采用。运输设备大都采用直升机，起飞点借用城市已有空港，工地不特设机场。利用水电工程附近已建民用机场运输急需的施工人员，然后转乘公路运输至工地，也是其他对外交通方式的主要辅助方式。

shigong fuzhu gongcheng touzi

施工辅助工程投资 （cost of construction ancillary works） 为辅助水电站工程施工而修建的临时性工程的投资。施工辅助工程包括施工交通工程、施工期通航工程、施工供电工程、施工供水系统工程、施工通信工程、施工管理信息系统工程、料场覆盖层清除及防护工程、砂石料生产系统工程、混凝土生产及浇筑系统工程、导流工程、施工期安全监测工程、施工期水情测报工程、施工和建设管理房屋建筑工程以及其他施工辅助工程等。

施工辅助工程投资根据不同阶段设计深度和项目类别，按工程量乘以工程单价（单位造价指标）或按相关工程投资百分比计算。

shigong gongchang sheshi

施工工厂设施 （construction plant and facilities） 为工程建设服务的加工、制造、修配和动力供应等临时性设施。主要包括砂石加工系统，混凝土生产系统，施工供水、供电、通信系统及其他工厂设施等。

砂石加工系统 主要为工程生产、供应砂石骨料，见下图。

系统布置 砂石加工系统应尽量靠近运输干线，并便于供水和供电，应尽可能远离职工居民的生活区，厂区高程应满足防洪要求。多料场供料的砂石加工系统，一般应尽量在主料场附近集中设厂。当集中设厂会引起大量弃料或物料倒运时，也可在若干个料场分设系统；料场与砂石用户较近



砂石加工系统

时，可与混凝土生产系统联合设厂，共用堆料场和其他设施。如果人工料场距主要用户较远，可考虑在料场设厂，或将粗碎车间布置在料场，而将其余设施布置在混凝土生产系统附近或其间的适当位置，半成品料的运输可通过比较采用汽车或胶带运输机。砂石生产受气候、设备检修等影响，常设置成品料堆存场来调节，成品料堆场需满足砂石自然脱水时间要求。采用人工砂石料源，半成品堆场容积不小于5天砂石需用量，成品料堆场容积不小于7天砂石需用量。

系统生产能力　一般用月和小时处理能力表示，应根据工程混凝土需用的骨料数量及砂石加工、储存、运输的损耗补偿系数来计算。随着施工技术水平的提高，砂石生产系统的规模越来越大，三峡水利枢纽下岸溪砂石加工系统生产规模达到2700t/h，向家坝水电站马延坡砂石加工系统的生产规模达到3000t/h。

系统工艺及设备　一般包括破碎、筛分、清洗、储料（包括毛料、半成品和成品料）、环保设施等工艺环节。

（1）破碎。生产人工骨料时，首先要将爆碎后的石块进行粗碎、中碎、细碎数段破碎加工，采用的机械设备有旋回式、颚式、圆锥式、锤式、反击式、棍式等破碎机，在工艺设计时根据石料的岩性和颗粒尺寸选择流程及设备。一般采用立式冲击破碎机和棒磨机生产人工砂。用天然料生产骨料时，为了生产出所需级配的成品料，也可对较大粒径的卵砾石进行破碎。

（2）筛分。采用振动筛、圆筒筛、格筛等筛分机械，将已经破碎的石料或天然砂砾石，按要求的级配筛分成不同粒径级别的各种成品料。

（3）清洗。对碎石或卵砾石等粗粒料，一般在筛分过程中用压力水进行冲洗，以清除料物中含有的黏土、淤泥、有机物、石粉等杂质。对人工砂或天然砂等细粒料，可通过砂处理设备、螺旋分级机、链板洗砂机等机械，经过冲洗、分级、脱水，除去污物和杂质。

（4）储料。采用开挖料作为料源时，毛料的储量一般按开挖强度、利用量、储存条件等因素来确定。采用天然料作为料源时，毛料的储量要考虑汛期、冰冻期停采的影响，其储量一般大于停采期所需毛料的1.2倍。成品堆料场容量应满足自然脱水要求。当堆料场总容量较大时，尽量堆存毛料或半成品。砂料仓一般考虑设防雨棚。

（5）环保设施。在砂石加工、运输和堆存过程中将产生大量的废水、粉尘和噪声，对周围的环境产生影响。砂石厂通常设置专门车间处理废水，处理后的废水可重复利用。粉尘的控制可以采取湿法为主的加工工艺，尽量减少生产环节及转运落差，密封尘源。主要尘源点采取喷水雾降尘或除尘器收尘的措施。噪声源车间通常采用维护结构设置隔音材料、主要设备加隔振机座、安装隔音罩及消声器等控制措施。

混凝土生产系统　主要为工程生产制备混凝土拌合物的系统。

系统布置　混凝土生产系统是水电工程的重要施工工厂设施。合理布置混凝土生产系统，对混凝土工程的施工质量、施工进度和经济性，都有重要作用。混凝土生产系统的设置也受到许多因素的影响，包括：①主体工程建筑物的布置及混凝土工程量。②混凝土建筑物的浇筑程序及施工进度。③混凝土的浇筑方法及其特点。④混凝土的技术特性及冬夏季施工的特殊要求等。布置混凝土生产系统时，要综合考虑这些因素，因地制宜，达到地基稳固、布局紧凑、高程适当、运输方便的要求。在独立大型混凝土生产系统中，拌和楼以1～2座为宜，一般不超过3座。有的大型工程，为适应各部位和各阶段施工的需要，在两岸或不同高程分设生产系统。

系统生产能力　系统的生产能力应满足高峰浇筑强度的需要，并有适当的富余。生产能力设置过大，会造成设备积压，效率不能充分发挥；设置过小，会影响混凝土生产、运输和浇筑的强度。确定混凝土拌和系统的生产能力，还要考虑高峰期同时浇筑混凝土块体的数量和浇筑仓面的大小、混凝土配合比的品种数目以及浇筑地点的集中程度等。小湾水电站左岸拌和系统采用4座$4\times3m^3$拌和楼，实际生产能力达到23万m^3/月。

系统工艺及设备　混凝土生产系统由储料、输送、配料、拌和、出料等成套设施所组成，包括混凝土拌和设施，骨料堆存输送系统，水泥储存输送系统，制冷、供热系统，掺合料和外加剂系统，环保设施等。

（1）混凝土拌和设施。混凝土拌和设施有不同的类型，主要分为：①混凝土拌和站，多用于混凝土工程量不大的中小型水电工程，将若干搅拌机集中在一起进行生产，结构简单，可因地制宜，便于布置，也能同时生产几种强度等级的混凝土。但一般搅拌容量小，生产效率低，自动化程度不高，劳动强度大，称量不易准确，拌制的混凝土均匀性较差，不易保证混凝土质量。②混凝土拌和楼，分为自落式和强制式两种，多用于大中型水电工程。将进料、储料、配料称量、拌和及出料都集中在一座楼上，构成一座可自动控制、集中操作的定型的装配式混凝土工厂，见图。自上而下一般分为进料层、储料层、配

混凝土拌和楼示意图

1—进料带式输送机；2—储料仓；3—衡量设备；4—集料斗；5—搅拌机；6—混凝土出料斗；7—胶凝材料罐；8—附壁式冷风机

料层、搅拌层及出料层，布局紧凑，占地面积小，生产效率高，混凝土质量容易保证。③移动式拌和装置，可用于工程量不大的中小型工程，由水泥储罐及水泥称量装置、分格的骨料储仓及骨料称量装置、搅拌装置等三部分组成。每一部分都是自带动力的整套装置，可用牵引车拖带在公路上行驶。其优点是机动性好、组装简易，缺点是占地面积大、用人较多。

（2）骨料堆存输送系统。为保证混凝土拌和楼连续生产而设立的骨料储存和输送设施所形成的系统。骨料由砂石加工系统成品料仓运来，经受料仓、胶带输送机、堆料机或卸料小车按不同规格分别堆存，也可与砂石加工系统公用料仓直接向拌和楼供料。储存方式一般采用露天分格堆存，受场地条件限制时，亦常用料罐或竖井储存。储料场应充分利用地形条件布置，尽量减少工艺环节和设施，并尽可能缩短至混凝土拌和楼间的输送距离。储存量应按混凝土浇筑强度及成品料运输条件确定。

（3）水泥储存输送系统。大、中型混凝土系统内通常设有机械化装卸的罐式水泥仓库，其储存量按混凝土高峰生产能力、水泥供应方式与可靠性等因素来确定。当采用散装水泥时，可用专用散装水泥车（船）由受料库或中转库将水泥运来，采用气力输送或机械输送的方式卸料入库。如采用袋装水泥，则应设置袋装水泥库与拆包间，水泥经拆包后输入水泥罐。水泥输送方法一般以气力输送为主，或配合以螺旋输送机和斗式提升机等机械。

（4）制冷、供热系统。在不同气候条件下工程对混凝土出机口温度的要求而设置的控制混凝土温度的设施。夏季施工时根据混凝土出机口温度要求，可采用加冷水、加冰、在料仓内对粗骨料通冷风、在胶带机上对粗骨料喷淋冷水等预冷措施。制冷系统一般包括制冷设备、制冷水和制冰设备、储冰库、冷风机及水循环等设施。坝体冷却所需的冷却水可根据工程实际情况与上述制冷系统结合，也可单独设制冷水车间。在寒冷地区冬季进行混凝土施工时，需加热水拌和或将骨料预热，使混凝土出机口温度符合设计要求。骨料预热可在料堆、料罐或拌和楼料仓内采用蒸汽排管或热风等预热方法。供热系统一般由锅炉房、预热料仓（料罐）及供热管道、蒸汽排管、热风机等组成。

（5）掺合料和外加剂系统。为改善混凝土性能，减少水泥用量，常采用加掺合料和外加剂。水工混凝土掺合料一般有粉煤灰、矿渣及火山灰质材料等，以掺粉煤灰为多。现场掺合方法有干法与湿法两种，以干法为主。干法进料与水泥相同，按掺量比例与水泥同时进入拌和机，单独设料罐、料仓与输送系统，不能与水泥共用一套，以免串通混料。湿法系将粉煤灰与水分别计量后放入拌浆桶搅拌，然后输入储浆罐，通过管道输入拌和楼内配浆桶，经称量后进入拌和机。外加剂按其功能大致可分为减水剂、加气剂、缓凝剂、速凝早强剂等类。外加剂一般以液体或干粉状成品运抵工地，在混凝土系统的配制车间中进行稀释或溶解成规定浓度的溶液，通过管道及耐酸泵送到拌和楼内的外加剂储存箱，经过称量与水同时进入拌和机。在简易拌和站内，一般用人工以体积计量与水同时掺入。

（6）环保设施。混凝土生产和二次筛分过程中将产生大量的废水，对周围的环境产生影响，通常设置专门的废水处理车间。如砂石加工系统与混凝土生产系统结合布置，废水处理车间也可结合考虑。

施工供水 为满足主体工程施工需要，提供主体工程施工用水、施工机械用水、施工辅助企业生产用水、生活用水、消防用水等的系统，主要由取水设施、净化设施、输水设施等组成。（见施工供水）

施工供电 将来自电力系统的高压电能经过降压，或将自备电厂发出的电能（有时需要升压），或将两者联合起来输送到各分区变电站，再供给工地各用户生产用电和生活用电的系统。它由总变电站、分区变电站、高低压供（配）电线路所组成。（见施工供电）

施工通信 水电站施工期间，用于施工工地内部及对外的通信，一般与地方通信网络相结合。

其他施工工厂设施 包括有混凝土预制件厂、钢筋加工厂、木材加工厂、机械修配厂、汽车保养站、压力钢管加工厂、机电设备拼装厂等，该系列工厂的布置及规模根据水电站所在地的外部条件、施工进度和加工强度等因素来确定。施工机械设备的大型修配一般利用当地城镇的大型修配厂，在施工现场仅设置小型的修配设施。

shigong gongdian

施工供电

（power supply for construction） 供应工程施工生产、生活用电的系统。水利水电工程施工用电具有负荷大、电压等级高、供电网络复杂、可靠性要求高的特点，施工供电已经成为水电站建设的重要组成部分。

用电负荷计算 通常采用总同时系数法、需要系数法及负荷曲线法进行计算。总同时系数法是将工程用电设备容量的总和乘以总同时系数，总同时系数一般取 0.25～0.4。该方法计算简单，但精度较差。需要系数法是以水电工程施工高峰年使用的各种机械设备额定容量、室内室外照明负荷乘以需要系数后相加，然后再乘以扩大系数、同时系数及损耗补偿系数。负荷曲线法是以经验数据和施工进度为依据，绘制施工期用电负荷曲线，由高峰负荷即可确定施工用电负荷容量，该方法计算较为精确。当基本资料缺乏时，高峰负荷可按整个工程用电设备总容量的 25%～40%计算。

施工电源选择 应考虑经济、灵活、可靠、满足高峰期施工用电要求等因素，经过比较和论证后确定。对于中断供电将造成人身伤亡和重大损失的一类负荷（如地下工程的照明、通风、排水，汛期泄洪设施用电，医院急救中心等），还应考虑备用电源。根据工程所在地区电力供应状况和水电工程施工特点，通常选择所列一种或两种方案作为施工电源：①利用提前架设的永久或临时配电线路由地方电网供电，施工完成后一般留作电站厂用电外来备用电源；②柴油发电机供电，因成本较高，故只在中、小型工程且无其他电源时采用，对于大型水电工程，一般采用柴油发电机作为施工供电的应急备用电源；③主体工程施工前期修建小水电站作为施工供电电源，主要适用于坝址地处偏僻、地方电网无法满足施工期用电需要的大、中型水电站施工。

供电线路 外部供电线路电压等级一般选择 35～220kV，根据输电距离、远景输电电压等级等确定。35kV 电压等级合理输送半径为 20～50km，输送容量为 2000～10 000kW；220kV 电压等级合理输送半径为 100～300km，输送容量为

100 000～500 000kW。

施工总变电站　又称施工总降压站，是施工区附近设置的总变电装置，一般布置在负荷中心区域，由变压器及一级输出配电线路组成。一级输出配电线路回数根据施工区供电要求设置，配电电压等级多采用 10kV。

分区变配电装置　在各施工用电区点设置的变配电装置，与施工总变电站的配电输出线路相连接，根据各施工区用电容量、机械设备的电压等级设置配电变压器，其出线和用电设备相连。分区配电输出线路电压等级一般为 220/380V。

shigong gongshui

施工供水　(water supply for construction)　供应工程施工过程中的生活、生产和消防用水的系统。系统供水方式应根据工程施工特点、不同用户的用水要求及水源情况，进行技术经济比较后确定。辅助企业生产用水应从水资源的节约利用考虑，采用复用或循环系统。施工供水系统一般由取水、净水和输配水等系统组成。

水源选择　施工水源一般有地表水源和地下水源两类。地表水源是指当地河流水或者水量较大的溪流水。地表水水量及水质有保证，且取用方便、经济合理，绝大多数水电工程都是采用地表水作为施工水源。地下水源水质好，使用前需要进行必要的勘探工作。对施工用水量特别大的水电工程，地下水源水量难以保证，也不经济。地下水源仅适合作为小型工程和生活用水的水源。

用水量计算　施工高峰用水量计算是根据工程施工总进度安排的各单项工程高峰期施工强度、规模或数量来确定各类用户的用水量，包括施工项目用水、施工机械设备用水、施工工厂设施用水及生活用水量。通常采用负荷曲线法、峰值叠加法进行计算。负荷曲线法是根据各类用水户逐月计算的日最高用水量，绘制各用水户用水负荷曲线，叠加后得出系统用水负荷曲线，取其峰值并适当乘以扩大系数，该方法计算较为精确。峰值叠加法以主体工程施工高峰期强度及相应的施工工厂设施、工地员工人数等计算各类用水户日最高用水量，然后分类叠加并适当乘以扩大系数。另外，要用上述用水量之和复核消防用水量，两者需同时满足。

取水系统　有固定式取水泵站和移动式取水泵站。固定式取水泵站一般由集水井和泵站两部分组成，分为河床式和淹没式取水泵站。移动式取水泵站主要有缆车式取水泵站和浮船式取水泵站。移动式取水泵站具有土建工程量少、投资小、施工快的优点，在水电工程水源泵站和临时性泵站中广泛使用。

净水系统　去除原水中有害的悬浮物质、胶体物质和细菌、病毒及其他杂质的系统。净化后的水质须满足生活饮用水和生产用水的要求。生活饮用水除了满足上述要求外，还必须满足水中不得含有病原微生物，水中所含化学物质及放射性物质不得危害人体健康，水的感官性状良好。常用的净水处理工艺有沉淀、混凝、过滤及消毒等。生活饮用水必须进行消毒处理。

输配水系统　包括输水管路、调节水池及配水管网。输水管路是将取水泵站的水输送到配水系统高位水池的管路或管渠；高位调节水池是为调节水量、满足供水水压要求而设，应结合地形、地质条件布置；配水管网是由净水厂或高位水池向用户配水的管道，一般由均匀分布在供水区域的干、支管线组成。配水管网一般布置成环状或枝状。

shigong jiaotong yunshu

施工交通运输　(construction transportation)　工程施工期内运输方式、运输路线和运输管理工作的统称。水电工程施工交通运输包括对外交通和场内交通两部分。

对外交通　从已建公路、铁路车站（物资转运站）、城镇、水运码头运输外来物资设备、人员至发电厂房或坝顶的交通。通常在施工期间自成运输管理系统，运输量和运输强度相对稳定。工程竣工后大都留作电厂永久对外交通线路。水电工程施工的对外交通运输方式有公路、铁路、水运和空运 4 类：①公路是水电站施工普遍采用的对外交通运输方式，其优点是建设工期短，运输机动灵活，适应复杂地形、地质要求，能满足施工中各类设备和物资运输，建设投资小，运行管理简单，但单位运价较高；②铁路运输是从已有的铁路站场接轨，其优点是运输能力大、单位运价低、外来器材减少装卸转储损耗，但线路建设造价高，且不能单独承担工地全部对外交通运输任务；③水运在工地附近有通航河道时采用，并须设专用码头，其优点是投资省、运输能力大、运费省，但易受季节影响，在水电站施工中一般只作为对外交通的辅助运输设施，还需设公路才能解决全部对外运输任务；④空运只在偏僻山区、采用其他运输方式显然不经济、工地急需某种器材设备或抢救伤员时才采用，大都采用直升机，起飞点借用城市已有空港，工地不特设机场。（见施工对外交通）

场内交通　联系工地内部各施工区、料场、堆弃渣场以及各生产生活区之间交通，担负施工期间工地内部的运输任务。运输量和运输强度比较复杂，有外来的钢筋、钢材、水泥等物资的转运，大量土石方运输，混凝土浇筑及设备安装、运输等。运输量和运输强度与施工进度安排直接相关，运输时间和运输强度要求不同，运输方式和运输设备各异。由于水电工程建设周期长、高峰强度大、重型车辆多、行车密度大、施工区地形复杂，且场内交通线路除上坝路、进厂路外在施工完毕后又大多不用，因此通常多采用临时公路运输方式。其他场内交通方式有轨道运输和胶带机连续运输。前者常用于中、小断面隧洞出渣，少部分运输混凝土熟料，有准轨和窄轨之分，且各自成系统；后者常用带式输送机运输混凝土骨料、土料，少数运输混凝土熟料。（见施工场内交通）

shigongqi duxun

施工期度汛　(flood protection in construction period)　汛期为了预防暴雨、洪水的危害，确保工程安全，保持正常施工条件所采取的各项措施。施工期度汛包括防洪规划、防洪准备、工程保护与基坑度汛 4 个方面。

防洪规划　根据施工组织设计和施工导流各阶段要求，按照建筑物的等级、施工条件、防洪要求以及对下游主要工矿企业和城镇的影响，提出分年度度汛标准（见施工导流）、度汛范围、度汛措施和实施计划。

防洪准备　包括：编制并审定防洪度汛报告；建立防洪组织；设置水文、气象和洪水预报系统，预报流域内暴雨、河道洪峰、洪量及相应上游水位；建立防洪通信设施；备好

防洪安全电源；准备防洪器材、物资及机械设备；调查落实可能产生山洪、泥石流的地段并提出报告，进行相应工程治理；检查落实工程度汛形象面貌及度汛措施；对库岸、工程区边坡、堤防、道路、桥涵、施工营地进行安全检查，对存在安全隐患的部位采取必要的工程处理及预警措施；针对可能出现的超标洪水，制订应急抢险预案等。

工程保护　主要包括：①对工程生产区和生活区的保护，使生产设施、施工场地、施工营地和水电管路等免受淹没、泥石流冲击等，做好排洪设施；②保持道路畅通，必要时设置漫水桥、漫水路面或加高路堤等度汛交通措施；③预先备足施工用材料，将机械设备转移到安全工作位置；④做好基坑内过水面的保护等。

基坑度汛　根据导流方案采取相应措施。在初期导流阶段，对于不过水基坑，主体工程汛期正常施工，应加强洪水预报，做好超标准洪水度汛预案；当预报洪水超过度汛标准洪水时，应及时撤离施工人员及器材设备，采取超标准洪水应急措施。对过水基坑，汛期基坑停止施工，基坑提前充水。在中后期导流阶段，由坝体拦洪，度汛标准应提高。对混凝土坝或浆砌石坝，常采用在坝上预留缺口、底孔，配合导流泄水建筑物或永久泄水建筑物联合泄流；对于土石坝，常由导流泄水建筑物与永久泄水建筑物联合泄流，当坝体较低时，对坝面采取保护措施后，也允许坝面过水。

shigong zongbuzhi

施工总布置　(construction general layout)　对主体工程施工所需场地、施工工厂设施、场内交通、施工营地、料场及渣场、供应管线、场地防洪排水等的布置规划。其作用是协调内部与外部、平面与立面、局部与整体间的关系，保证施工环境条件，提出施工征地范围，控制移民规模等。

布置方式　水电工程的施工总布置，根据工程枢纽布置特点、施工场地和交通条件及施工组织管理模式，可采用集中式、分散式或混合式布置。对外交通方便、工地附近有足够的场地可满足施工总布置需要的工程，如水工枢纽建筑物相对集中的坝式水电站，宜采用集中式布置。工程项目分散、场地零星分布、交通相对困难的工程，如引水式水电站，可采用分散式布置。对既有大坝又有引水系统的水电站，可采用混合式的布置方式。水电工程枢纽建筑物一般布置在河道狭谷区，受地形、场地条件限制，施工总布置方式多采用相对集中的混合式布置方案，有利于施工区封闭管理。

布置原则　施工总布置涉及的内容比较广泛，每个工程各有特点，在进行总布置方案规划时，应遵循的原则包括：①根据工程施工特点和进度要求，选择适当的施工临时设施项目和规模，尽量利用地方已有的工厂设施或结合当地城镇规划设置生活设施，做到永临结合；施工场地根据进度安排做到前、后期重复使用。②贯彻执行合理利用土地的方针，施工总布置方案应力求协调紧凑，节约用地。尽量利用荒地、滩地、坡地和水库淹没土地，少占耕地和经济林地；最大限度地减少对当地群众生产、生活带来的不利影响。③做好土石方挖填平衡，减少弃渣；注重环境保护，减少水土流失，充分体现人与自然的和谐相处。④相互干扰少，方便管理，经济合理。⑤各类建筑和设施布置场地应避开不良地质、滑坡体和可能受到泥石流、沙暴、雪崩等地质灾害影响的地区，尽量避让文物古迹和保护环境敏感对象，满足防洪要求等。

总体布置规划　进行总布置规划时，应按8个功能分区分别进行规划，统筹安排施工所需场地和各类设施的平立面布置以及相互间的联系：①主体工程施工区；②施工工厂设施区；③当地建材开采及加工区；④仓库、站、场、码头等储运区；⑤机电、金属结构和大型施工机械设备堆放、安装区；⑥工程渣料堆（弃）存区；⑦施工管理和生活区；⑧工程建设管理区。

以混凝土建筑物为主的枢纽工程，施工区布置宜以砂石料开采、加工，混凝土生产、浇筑系统为主；以当地材料坝为主的枢纽工程，施工区布置宜以土石料开采、加工，堆料场和上坝运输道路为主。

机电设备和金属结构的仓库、拼装加工厂宜靠近主要安装地点，并方便装卸和场内运输。主要物资仓库、储运系统宜布置在场内外交通干线衔接处或沿线附近区。特种材料仓库（如油库、火工材料库）布置应满足中国有关安全标准要求。

生活设施按“以人为本”的原则布置，生活设施与生产设施之间要有明显界限。

为了做好施工总布置，常需根据移民难度和环境保护要求进行多方案的比较。通过方案比较，经全面系统论证，选定施工总布置方案，施工总布置最终成果以施工总布置图和施工总布置报告的形式体现。主要成果内容包括：①料源选择与料场开采范围；②场内交通主要线路和设施的布置及其与对外交通的联系；③施工工厂设施和施工营地布置；④土石方平衡及工程弃渣堆放场地范围，渣场的环境保护和水土保持措施；⑤业主机电设备、金属结构和大型施工机械安装堆放场地；⑥风、水、电、通信系统及其他动力厂站位置及主干管线；⑦物资转运站、码头、仓库等储运设施；⑧主要的土建及机电安装标段施工临时设施的布置区域；⑨对施工区内的料场、渣场等均应提出土地复耕、环境保护和水土保持的处理方案；⑩提出施工用地和征地范围图。

shigong zongjindu

施工总进度　(construction general schedule)　工程建设从筹建开始到工程完建，施工项目在时间安排上的总体计划。施工总进度是施工组织设计和施工建设管理工作的内容之一，是指导施工、制订工程分年度生产计划的依据。合理的施工总进度安排是保证工程工期、质量、安全、经济，并顺利实现建设目标的有效手段。

总进度的阶段划分　工程建设全过程可划分为工程筹建期、工程准备期、主体工程施工期及工程完建期四个阶段。DL/T 5397—2007《水电工程施工组织设计规范》规定，工程施工总工期为上述后三项工期之和，首台机组发电工期为工程准备工期和主体工程施工工期之和。

（1）工程筹建期。工程正式开工前由业主负责为承包单位进场施工创造条件所需的时间。主要工作包括对外交通、施工区征地移民、施工供电、通信、招投标等。

（2）工程准备期。准备工程开工起至关键线路上主体工程开工前的工期。主要工作包括场地平整、场内交通、施工导流、施工工厂、生产设施、生活设施等。

（3）主体工程施工期。主体建筑物项目施工开始至第一台（批）机组发电或工程开始收益为止的工期。主要工作包括完成永久挡水建筑物、泄水建筑物和引水发电建筑物等土建工程及其金属结构和机电设备安装调试等主体工程施工。

（4）工程完建期。第一台（批）机组投入运行或工程开始受益为起点至工程完工的工期。主要工作包括完成后续机组的安装调试、主体土建工程的剩余工作以及导流泄水建筑物的封堵等。

水电工程施工进度的特点　水电工程建设是一项规模庞大、施工工序复杂的系统工程，受水文、气象、地形、地质等自然因素和社会因素影响，具有施工条件多变、施工时段受导流规划影响的特点，而且没有可资遵循的标准进度，因此编制施工总进度有一定难度，可靠性受客观条件影响较大。①施工时间性的特点，如河道截流时段要选择在枯水初期，以便截流后有较长的枯水期进行围堰及基坑施工；蓄水一般希望选择在汛末或汛前，以缩短蓄水时间早发电；为实现施工期间防洪度汛所要求的各阶段工程形象面貌，必须根据水情及时调整工程施工节点、施工程序和施工强度；混凝土坝施工的坝体接缝灌浆需安排在气温较低的季节，混凝土充分收缩、接缝张开度大的时候进行等。②施工间断性的特点，如分期围堰导流方式，将整个工程分期分段施工，同时前期工程要为后期工程创造导流条件；在采用枯水期导流时（见断流围堰导流），汛期建筑物过水部分被迫停工，非过水部分虽仍可施工，但受到施工条件和工作面缩小等影响而要间断施工或降低施工强度。以上种种因素都会造成工程施工程序的变化，工序不连贯或工作面交替频繁，从而导致有效工日减少、施工强度不均衡、工期变化等。对于综合性开发的水电站工程，在编制施工总进度时还要考虑到交通、航运、灌溉、防洪及下游供水等方面的要求。

总进度编制原则　主要有：①严格执行基本建设程序。②参考国内已建工程实际施工经验，采用中国国内平均先进施工水平安排工期。③重点研究受洪水威胁的工程和关键项目的施工进度计划，各期工程施工的形象面貌要满足相应防洪、蓄水、环境保护和移民、征地的要求。④单项工程施工进度与施工总进度相互协调，各项目施工程序前后兼顾、衔接合理、干扰少、施工均衡。⑤运用网络计划等技术，确定施工关键路线并对主要进度指标、施工程序、分年度投资计划、资源与机械设备供应计划，以及劳动力组织等进行全面优化，实现均衡施工。⑥编制过程中要与交通、航运、灌溉、下游供水等有关部门联系，使工程建设和谐，避免干扰和矛盾。

总进度表示形式　主要有横道图、斜线图与网络图3种。在施工总进度中，应重点标明开工时间、截流时间、蓄水时间、首台机发电时间、工程完工时间等。

（1）横道图。又称甘特图（Gantt Chart），是按单项工程逐工序安排的，以纵坐标表示工程项目，横坐标表示工期，在横线上、下注明分期完成的工程量，施工强度，以及分阶段达到的工程形象面貌。其表达方式比较简单、直观，但各项工程之间的逻辑关系不够明确。图1是以混凝土拱坝为例的施工总进度示意表，施工方案是以断流围堰配合隧洞导流、缆索式起重机施工，隧洞引水，岸边厂房布置，进度安排至第二台机组发电。

项目		工程量				工期															
		单位	土石开挖	混凝土浇筑	其他	第一年				第二年				第三年				第四年			
						1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
准备工程																					
导流工程	隧洞																				
	围堰												截流 ▽								
	下闸蓄水																				
混凝土拱坝	坝基开挖																				
	混凝土浇筑																				
	接缝灌浆																				
引水工程																					
厂房工程	基础开挖																				
	混凝土浇筑																				
	机组安装																				

图1　水电站工程施工总进度横道图

（2）斜线图。表示方式与横道图相似，但它还利用斜线表示出分项工程之间的工序衔接，计划协调和主要机械设备调度，体现出平行流水和交叉作业的关系。斜线图一般多在单项工程（如长引水隧洞）或生产工艺流程中使用。对于错综复杂的施工总进度使用较困难。

（3）网络图。将工程施工全过程的各项活动，按项目之间与工序之间的有机联系与逻辑控制条件用节点和矢线组合成网络，然后通过利用计算软件进行计算模拟，通过施工进度分析、资源平衡及优化，可以在错综复杂的施工环节中寻找出控制施工进度的关键工作，并选定关键路线。同时，还可在施工过程中，根据施工信息反馈，及时对进度计划进行动态调整，见图2，图中序号之间的数字为完成该工序的月数，其工程举例同图1。

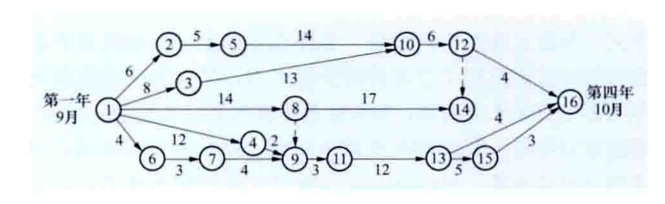


图2　水电站施工总进度网络图

①→②—厂房削坡；②→⑤—厂房开挖；⑤→⑩—厂房混凝土；⑩→⑫—第一台机组安装；⑫→⑯—第二台机组安装；①→③—引水隧洞开挖；③→⑩—引水隧洞混凝土衬砌；①→④—导流隧洞施工；④→⑨—截流及围堰；⑧、⑭—截流和第一台机组发电的时间控制节点；①→⑥—上坝公路开挖；⑥→⑦—缆索式起重机平台开挖；⑦→⑨—坝肩削坡；⑨→⑪—大坝基坑开挖；⑪→⑬—坝体混凝土；⑬→⑮—溢流闸门安装；⑬→⑯—坝体接缝灌浆；⑮→⑯—大坝尾工

20世纪90年代中国引进美国的P3（primavera-project-planner）项目计划软件，使横道图和网络图有效地结合，并以横道图的形式表达，具有施工项目之间逻辑关系表达直观，又可以利用计算机对施工进行动态管理的功能，较大地提高了施工管理水平。21世纪初，中国在多个水电工程中应用计算机施工仿真技术模拟土石坝、混凝土坝、地下厂房等的施工进度，并利用信息网络技术进行动态管理，提高了施工管理水平。

shidi baohu

湿地保护 （wetland conservation） 利用水电站的调蓄作用对湿地的数量和质量进行保持和维护。

湿地的定义 从广义上看，湿地包括湖泊、河流、沼泽（森林沼泽、藓类沼泽和草本沼泽）、滩地（河滩、湖滩和沿海滩涂）、盐湖、盐沼以及海岸带区域的珊瑚礁、海草区、红树林和河口等。

湿地的作用 湿地是地球上水陆相互作用形成的独特生态系统，是重要的生存环境和自然界最富生物多样性的景观之一，在抵御洪水、调节径流、补充地下水、改善气候、控制污染、美化环境和维护区域生态平衡等方面有着重要的作用。

基本原理 湿地保护主要包括水环境恢复、植物微生物恢复、基质恢复3个途径。水电站建设在湿地保护方面的环境效益主要是通过水环境恢复这一途径来实现，具体体现在水库形成新的湿地和水库运行调度对湿地水量的补充两个方面。

水电站建成后库区水面增加，经多年稳定运行、周期性的水位涨落和自然修复，库区和周围环境会形成独特的相对稳定的湿地生态系统，从而对调节径流、控制污染、调节当地气候、保护当地生物多样性及生态平衡发挥重要作用。

水电站建成后，通过发挥水库的调节性能，可以调节河流水量的季节分配，在枯水期泄放相应的水量，对湿地水量进行适当的补充，适度扩大湿地水域面积，为栖息于湿地中的各种生物提供更多的生境。

工程实践 中国小浪底水利枢纽位于黄河中游最后一个河段峡谷出口，是控制黄河下游水沙过程的关键工程，具有以防洪、防凌、减淤为主，兼顾供水、灌溉和发电，蓄清排浑，综合利用，除害兴利的功能。由于小浪底工程的调水调沙作用，一方面，黄河三角洲湿地来水连年增加，河道不断刷深，有效地减少了河道和湿地的淤积量，防止水域底部因淤垫变浅和缩小范围，避免水生群落向旱生动植物群落演化；另一方面，也给河口地区输送了大量泥沙，使黄河三角洲湿地面积明显增加，改善了黄河三角洲湿地的生态环境。

shidu

湿度 （humidity） 空气中水汽的含量或潮湿程度。常用水汽压、饱和差、绝对湿度、相对湿度、露点、比湿等物理量表示。测量湿度的常用仪器有干、湿球温度表，通风干湿表，毛发湿度表（计）和湿度计等。

（1）水汽压（e）。空气中水汽部分作用在单位面积上的压力，空气中水汽含量越多，水汽压越大。在一定温度下，空气中所能容纳的水汽分子的数量有一定限度，达到此限度时的空气称饱和空气，此时的水汽压称为饱和水汽压（E）。

（2）饱和差（d）。某一温度下饱和水汽压 E 与实际空气中水汽压 e 之差，$d=E-e$。在研究水面蒸发时常用到饱和差。

（3）绝对湿度（a）。单位体积湿空气中含有的水汽量，又称水汽密度，单位为 g/m^3。绝对湿度只能通过其他量间接推算。如水汽压 e 的单位取 mmHg，绝对湿度 a 的单位取 g/m^3 时，两者之间的关系为

$$a=289e/T_0$$

式中 T_0 为绝对温度。

（4）相对湿度（f）。空气中实际水汽压 e 与同温度下饱和水汽压 E 之比，用百分数表示。

（5）露点（T_d）。含有一定量水汽的空气，在气压不变的情况下降低温度，使空气达到饱和时的温度，也称为露点温度，以℃计。

（6）比湿（q）。一团湿空气中，水汽的质量与该团空气总质量的比值，以 g/g 或 g/kg 计。

$$q=\frac{m_v}{m_v+m_d}$$

式中 m_v 为水汽质量；m_d 为干空气质量。

shifang kaiwa

石方开挖 （rock excavation） 为满足工程需要，将岩体破碎、清除或搬运至指定地点的施工过程。石方开挖一般用凿岩设备钻孔，孔内装填炸药爆破，破碎后的石渣用挖装机具装入运输设备运至指定地点。在开采少量条石和开挖松软岩体时，也可用风镐、撬、楔等工具施工。石方开挖分石方明挖、石方洞挖和水下开挖3类。

石方明挖 露天岩体开挖。主要应用于建筑物地基、路基、渠道、溢洪道等工程开挖和石料开采。开挖方法根据不同地形、地质和建筑物的要求而定。对保留区岩体的完整性有一定要求及建筑物建基面以上（保护层范围）的石方明挖，常用浅孔分层松动爆破。对保留区岩体完整性要求不严或建筑物建基面保护层以上的厚层岩体开挖和石料开采，常用深孔梯段爆破（梯段高度一般为8～15m）。对保留区岩体完整性和岩石块度要求不高，且开挖区至保护对象已有一定安全距离的石方明挖，可用经过专门设计的大量药包洞室爆破。坝体石料开采应根据上坝料设计要求、料场地形条件、水文地质特点、爆破试验参数，以及开采量、上坝强度、装运机具等进行爆破设计，并根据相关条件通过现场试验调整爆破参数。石方明挖最常用的钻孔机具是以压缩空气为动力的各类风钻和液压凿岩机（见钻孔机械）。

石方洞挖 又称石方暗挖，是各种地下工程的岩体开挖。主要应用于各类隧洞、地下厂房、竖井、斜井等开挖工程。一般用凿岩机或凿岩台车钻孔，中心掏槽崩落，周边光面爆破或预裂爆破。在中等强度岩体中的直线长隧洞，经技术经济比较也可用全断面隧道掘进机开挖。

水下开挖 主要应用于清理航道礁石、位于水库死水位以下隧洞进水口等部位的开挖。常用表面敷设防水药包、定位钻孔装药爆破和岩塞爆破等技术进行开挖。

石方开挖爆破时，要防止爆破所产生的地震波对附近建筑物和设备的影响，人员要撤离至个别飞石及爆破冲击波（爆破时由于炸药突然分解产生的空气冲击波及有害气体）的影响范围之外。为了评价开挖爆破地震波对邻近建筑物的有害影响，水电工程施工中常要求对爆破地震波的震动影响进行监测。在水中及水下固体介质中进行爆破将产生水中冲击波及动水压力，并引起震动效应，应采取相应的安全措施。

水利水电工程石方开挖的石渣，石方明挖一般采用推土机配挖掘机或装载机装自卸汽车运输，石方洞挖一般采用推土机配挖掘机、装载机或装岩机装自卸汽车、矿车或带式输送机运输。超径块石在现场解体，以适应装渣设备斗容。

shifen

石粉 (rock powder) 岩石在生产加工过程中或磨细后直径小于 0.16mm 的粉末。石粉一般存在于混凝土人工骨料中的砂中，单独磨细的石粉还可与其他活性掺合料混掺，作为碾压混凝土的掺合料。

石粉颗粒在混凝土中的作用主要是微集料填充作用，即填充细骨料与胶凝材料之间的空隙。石粉大多属于非活性掺合料，但石粉中直径小于 0.08mm 的微粒具有一定的活性，且能起到一定的减水作用，促进水泥的水化。工程实践及试验证明，合适的石粉含量能改善砂浆及混凝土的和易性、保水性，提高混凝土的密实性、抗渗性等。过高的石粉含量对混凝土干缩不利。

骨料中的石粉含量以其占砂的质量比表示。在常态混凝土中，人工砂的最佳石粉含量为 6%～18%。在碾压混凝土中，最佳的石粉含量为 12%～22%，且粒径 $d \leqslant 0.08$mm 的微粒含量一般不低于 5%。当碾压混凝土人工砂中石粉含量达不到最佳含量时，往往造成现场碾压效果较差，通常采用外掺石粉的办法解决，如中国的官地水电站，采用石粉回收技术解决了人工砂中的石粉不足问题。某些工程还采用石粉等量替代胶凝材料中其他掺合料的方法解决现场碾压中的泌水现象，如中国的百色水电站，每立方米碾压混凝土中采用石粉等量替代胶凝材料中的粉煤灰 20kg，现场碾压效果得到了明显改善。

作为掺合料的石粉一般选择凝灰岩石粉、石灰岩石粉，并与其他活性掺合料混掺使用，掺量通过试验确定。中国的景洪水电站，按照石灰岩石粉与水淬锰铁矿渣粉各 50% 的比例混磨后作为碾压混凝土的掺合料，最大掺量达 60%。

shilifa jingliu tiaojie

时历法径流调节 (runoff regulation by time series method) 按历史径流重演的假定，用实测（含插补）的径流系列，根据发电和综合利用的要求，进行径流时空重新分布的分析计算方法。主要用于制订水库运行决策，拟定水库运行方式，并据此计算水电站的出力、调节流量、库水位、水头等的过程和各项统计特性，以及相应的保证出力和年发电量等动能效益指标。

调节方式 分为等流量径流调节、等出力径流调节、变出力（变流量）径流调节 3 种。

（1）等流量径流调节。在调节期（入库流量小于调节流量，要求水库补水的时期）内，各时段调节流量相等。主要用于要求均匀调节流量的水资源用户，如供水等，也用于以发电为主时水库的粗略调节计算。

（2）等出力径流调节。同一调节期内，出力相等。适用于系统对水电站出力的要求在年内各时段变化不大或不明确的情况。

（3）变出力（变流量）径流调节。水电站在年内不同时段以不同出力满足电力系统的要求，以不同流量满足综合利用需求进行调节。

计算时段的划分 将整个计算期划分为若干个时段，逐时段进行调节计算。计算时段的划分，从满足精度及节省计算工作量出发，调节期长的水库，计算时段可长些，调节期短的水库宜短些。对于具有季调节以上调节能力的水电站，计算时段长度一般用月，有时在汛期用旬。周调节、日调节和无调节水电站宜取日。若上游有调节期长的水电站，如果区间流量较小，其计算时段也可相应取长些。

计算依据及基本资料 包括：①电站的特征值（正常蓄水位、死水位、装机容量等）；②径流系列资料；③水库水位与容积、面积的关系曲线；④水库水量损失资料，含蒸发损失（与水库面积、气象条件有关）、渗漏损失（取决于水文地质条件和库水位）和结冰损失（在北方的冬季，融冰后仍回归水库）；⑤综合利用各用户从库内引水资料（引水时间、数量及水位）；⑥水电站泄流量（含发电流量和弃水流量）与尾水位的关系曲线；⑦发电流量与水头损失的关系曲线；⑧综合利用要求或限制；⑨水轮机运行特性资料；⑩水库及电站的运行方式。

基本公式 时历法径流调节的基本原理是水量平衡和能量转换，用公式表示为

$$V_{2i}=V_{1i}+(Q_{ni}-Q_{gi}-Q_{si}-Q_{ti})\Delta T_i \quad (1)$$

$$P_i=KQ_{gi}(Z_{ui}-Z_{li}-H_{fi}) \quad (2)$$

$$V_{1i}=V_{2j},\ j=i-1;\ 当\ i>1,\ V_{11}=V_{2n} \quad (3)$$

$$K=9.81\eta_t\eta_g$$

式（1）为水量平衡方程，式（2）为能量计算公式，式（3）为连续方程。式中 n 为计算时段数；i 为时段序号，$i=1,2,3,\cdots,n$；Q_{ni}、Q_{gi}、Q_{si}、Q_{ti} 为时段 i 的入库流量、发电流量、弃水流量、综合利用各用户库内引水及蒸发渗漏损失流量，m^3/s；V_{1i}、V_{2i} 为时段 i 初、末的库容，m^3；ΔT_i 为时段 i 的秒数；P_i 为时段 i 的平均出力，kW；K 为出力系数（见水电站出力），其中 η_t 为水轮机效率，η_g 为发电机效率；Z_{ui} 为时段 i 的水库平均水位，m；Z_{li} 为时段 i 的尾水位，m；H_{fi} 为时段 i 的水头损失（一般与实时发电引用流量的二次方成正比），m。

式（2）右端括号内的数值为水电站工作水头。

约束条件 包括库容约束、出力约束和综合利用约束。

（1）库容约束

$$V_{1i} \leqslant V_{max}$$

$$V_{1i} \geqslant V_{min}$$

式中 V_{max}、V_{min} 为与正常蓄水位、死水位相应的库容。

（2）出力约束

$$P_i \leqslant CAP$$

$$P_i \leqslant CAP+(H_i-H_r)DP$$

$$P_i \geqslant P_{min}$$

式中 CAP 为电站装机容量，kW；H_i 为水电站工作水头，m；H_r 为水电站额定水头，m；DP 为当水电站工作水头低于额定水头时，每 1m 水头差值相应的预想出力差值；P_{min} 为要求水电站的最小出力，kW。

（3）综合利用约束，包括：①防洪对汛期库水位的约束；②灌溉对灌溉期最小调节流量的约束；③航运对库水位及最小（或最大）调节流量的约束；④供水对最小调节流量的约束；⑤旅游、环保对库水位的约束等。

代表年及代表段的选择 时历法径流调节常用长系列径流资料进行计算，但有时为了减少工作量，可选择水文代表年或水文代表段（即代表年系列）进行计算。代表年或代表段的选择原则为：

（1）计算年的划分应以水文年为准，即每年的丰水期初

开始至次年的枯水期末结束。

(2) 调节性能为年调节及以下的水电站，可选代表年，但至少包括丰、平、枯3种代表年，且枯水年枯水段平均出力（水量）保证率应与设计保证率接近，平水年的保证率应接近50%，3种代表年的平均电量（水量）应接近长系列的平均电量（水量），且径流的年内分配要具有代表性。对于低水头水电站，在选择代表年时，应考虑由于丰水期下游水位升高致使电站出力减少这一因素。

(3) 多年调节水电站，要选系列代表段，且代表段的平均电量（水量）及年水量偏差系数，应分别与长系列的平均电量（水量）及偏差系数相接近，代表段内应包括丰、平、枯3种代表年及连续枯水年系列。

(4) 水电站群径流调节代表段（或代表年）的选择，应综合考虑水电群的出力和调节性能等因素。

计算方法　有数解法和图解法两种。随着电子计算机的普遍应用，图解法已失去了实用的价值。数解法精度较高，手工计算时常用列表法；电算时，常把一个时段的调节计算编成标准子程序。

数解法包括等流量径流调节、等出力径流调节和变出力（变流量）径流调节。

(1) 等流量径流调节。在调节期内的供水段及蓄水段按各自的等流量进行调节，即在满足各种约束条件的前提下，分别使各供水段及蓄水段的最小调节流量（发电流量）极大化。

(2) 等出力径流调节。在满足各种约束条件的前提下，分别使各供水段和蓄水段的最小出力极大化。试算步骤为：①根据粗算或等流量调节计算成果，假定蓄水段及供水段的等出力值；②根据假定的等出力值，进行一个时段的调节计算，即先假定发电流量，进行水量平衡及能量计算，求与假定的发电流量相应的出力值，并与假定的等出力比较，若满足精度要求，则一个时段的计算结束，否则重新假定发电流量，再进行该时段的调节计算；③供水段或蓄水段计算完毕后，必须检验库容是否放空（供水段）或是否蓄满（蓄水段），并检验原先假定的等出力值是否合适，若满足要求，则本段计算结束，否则重新假定等出力值，重新试算，直到满意为止。

(3) 变出力（变流量）径流调节。在满足各种约束条件的前提下，使水电站对电力系统的效益最大化。计算步骤与等出力径流调节的不同点在于，变出力径流调节是按电站的能量进行电力系统的电力电量平衡，求得一年内各时段本电站应发的出力，再逐时段按应发的出力进行径流调节；由于要进行迭代收敛，故电力电量平衡和径流调节是交互进行的。

shiwu zhibiao

实物指标

(object inventory)　建设征地范围内需要迁移的人口、征收征用的土地、补偿或处理的各种设施及经济对象的规模及其特征数据的总称。水库淹没影响区的实物指标是水库淹没处理规划设计的基本依据，是论证水电工程规模、比较工程设计方案、研究工程建设对地区经济及环境影响的重要指标，也是论证工程效益、编制建设征地移民安置规划、确定建设征地移民安置补偿费用以及建设征地移民实施等的基础资料。在中国，前期工作必须依据2007年12月中华人民共和国国家发展和改革委员会发布的DL/T 5377—2007《水电工程建设征地实物指标调查规范》，分门别类地进行实物指标调查，并取得所有者的认可。

分类　按社会经济结构类别一般分为农村、城镇和专业项目3个部分。按调查实物项目分类，有各类人口（如农业人口、非农业人口等），各类房屋（如钢筋混凝土结构、砖混结构、砖木结构、土木结构、木结构房屋和各种杂房等），各类附属建筑物（如烟囱、水塔、围墙、院场等），各类土地（如耕地、园地、水塘、宅基地、林地、牧草地、交通用地、未利用土地等）及各类专项设施（如交通、水利、电力、电信、广播电视、文物等）。

用于计算建设征地移民安置补偿费用的实物指标，应在调查统计的基础上，按照水电工程开工和完建的时间预测人口、房屋等相关指标的动态增长量，分析推算移民安置规划水平年的实物指标。

调查　水电工程建设征地移民设计的重要组成部分。其主要任务是查明建设征地范围内所涉及各对象的类别、数量、质量、权属和其他有关属性。实物指标调查的范围包括水库淹没影响区、枢纽工程建设区，以及建设征地居民迁移线外受建设征地影响的扩迁人口及其房屋、附属建筑物、零星树木等。实物指标调查分为农村、城镇、专业项目3部分进行归类调查和成果汇总。农村包括从事农业、林业、牧业、渔业生产为主的乡、行政村、村民组和农业户，以及城（集）镇所辖的郊区农村（组）和散设在农村的国有农、林、牧、渔场。集镇为乡政府驻地和经县人民政府确认的非建制镇，城镇是指县级以上（含县级）政府驻地和建制镇。专业项目是指铁路、公路、水运、水利、电力、电信、广播电视、工矿企业、文物古迹等专门设施。实物指标调查工作主要包括调查组织与分工、调查程序及调查方法3个方面。

调查组织与分工　实物指标调查需由项目主管部门或者项目法人会同建设征地所在地的地方政府共同进行，具体调查工作由项目法人委托的设计单位负责，地方政府和有关部门参与和配合。

调查程序　由设计单位提出调查技术要求，由项目主管部门或项目法人向省级人民政府或地方政府提出调查申请，经同意后方可开展调查。可行性研究阶段，实物指标调查前应编制实物指标调查细则，作为调查工作的指导性文件；省级人民政府发布“禁止在工程占地和淹没区新增建设项目和迁入人口”的通告，并对实物调查工作作出安排。调查成果由调查者和被调查者签字后，由地方政府进行公示，并签署意见。

调查方法　实物指标的取得应进行实地的调查。由于各项指标与时间和社会发展有着密切关系，有较强的时效性，因此应根据水电工程建设各设计阶段的要求对实物指标进行调查。通常分预可行性研究阶段、可行性研究阶段和招标设计阶段进行。

(1) 预可行性研究阶段，根据现有的统计资料调查人口数量，必要时进行局部或全部实地核实。对农业户的房屋，可选典型样本进行调查，典型调查的样本数不低于总数的20%；对非农业户的房屋，可通过有关部门的统计资料分析确定。征地范围内的土地调查采用不小于1：10 000的地形图或同等精度的

航片、卫片等解译成果，结合现场典型调查进行。

（2）可行性研究阶段，对建设征地居民迁移线内和线外扩迁的农业人口逐户逐项全面调查统计，非农业人口逐单位、逐户逐项调查统计；对房屋按照结构类别、用途（功能）、权属和计算标准，逐单位、逐户全面调查统计；利用实测的 1∶2000 土地利用现状图或同等精度的航片、卫片等解译成果，在国土、林业等部门的参与下实地调查地类界线和行政分界，以集体经济组织或土地使用部门为单位调查计算各类土地面积，必要时，对于农村承包的耕地、园地和林地，以集体经济组织的调查面积为控制，由县级人民政府负责将指标分解到户。对建设征地范围内城镇的基本情况、性质和功能、规模、市政基础设施、公共设施等进行全面调查；对专业项目，调查其规模、标准、等级、权属等。

（3）招标设计阶段，需埋设水库居民迁移和土地征用线永久界桩，如果招标设计阶段与可行性研究阶段相距在 5 年以上或库区社会经济发展有明显变化，宜根据实际情况对实物指标进行复查核实。

实物指标的调查统计成果涉及利益相关方的利弊得失，它的取得必须依法依规进行，确保客观、公正、公开、公平、全面、准确。

主要实物指标调查允许误差见表。

主要实物指标调查允许误差

主要项目	允许误差（%）	
	预可行性研究阶段	可行性研究阶段
人　口	±10	±3
房　屋	±10	±3
耕地、园地	±10	±3
林地、牧草地、未利用地	±15	±5

shijie shuineng ziyuan

世界水能资源　（hydropower resources in the world）

根据世界能源会议《能源资源调查》和英国《国际水电与大坝》杂志 1980～1995 年之间分别公布的统计数字，全世界水能理论蕴藏量在 34.2 万亿～44.28 万亿 kW·h/a 之间，技术可开发资源在 11.75 万亿～19.4 万亿 kW·h/a 之间，经济可开发资源在 7.3 万亿～9.35 万亿 kW·h/a 之间。根据英国《国际水电与大坝》杂志 2011 年发布的《World Atlas》统计，世界水能资源理论蕴藏量大于 40.2 万亿 kW·h/a，技术可开发量大于 14.6 万亿 kW·h/a，经济可开发量大于 8.7 万亿 kW·h/a，见表 1。亚洲水能资源约占一半。由于工作深度不同、统计口径不一致等原因，一些国际组织和刊物历次发表的数字均有一定出入。

表 1　世界水能资源概况（亿 kW·h/a）

洲别	理论蕴藏量	技术可开发量	经济可开发量
亚　洲	197 171	76 850	44 779
非　洲	25 065	11 838	7792
欧　洲	28 299	10 384	7797
南美洲	68 925	26 065	15 368
北美洲	76 008	19 078	10 587
大洋洲	6580	1850	887
全　球	>402 049	>146 066	>87 211

资料来源：英国《国际水电与大坝》杂志 2011 年发布的《World Atlas》。

巴西、加拿大和美国 2010 年都是以装机容量表示技术可开发量，缺少发电量数据。此次根据最近年份发布的发电量数据进行统计，其中巴西取自 2008 年，美国和加拿大都取自 2007 年。刚果（金）自 2004 年起技术可开发量都是以装机容量表示，根据其各年水电装机和发电量算出的各年年利用小时数，将技术可开发量装机转换成发电量。经计算，自 2004 年起统计数据比 1998～1999 年的数据小一半，权衡其在 2008 年发布的经济可开发量发布的数据（发电量），比 1998～1999 年少一半以上，则技术可开发量取 2010 年装机容量转换为发电量的数据为准。表 2 中所列为水能资源技术可开发量前 10 位的国家。

表 2　水能资源技术可开发量前 10 位的国家

国　家	技术可开发量（亿 kW·h/a）	排序
中　国	24 740	1
俄罗斯	16 700	2
巴　西	12 531	3
加拿大	9810	4
印　度	6600	5
美　国	5285	6
印　尼	4016	7
秘　鲁	3951	8
刚果（金）	3125	9
挪　威	3000	10

资料来源：英国《国际水电与大坝》杂志 2011 年发布的《World Atlas》。

水电开发程度没有统一的计算方式，习惯上采用水电年发电量与技术可开发量中的多年平均年发电量的比值作为水电开发程度。由于技术可开发量、经济可开发量随着技术、经济以及能源需求的变化会发生变化，因此各国发布的水电开发程度常有变化。表 3 列出了水能资源经济可开发量前 10 位的国家。

开发现状　到 2010 年底，全球水电装机容量超过 9 亿 kW，年发电量超过 3.4 万亿 kW·h，开发程度约为 24%（按技术可开发多年平均年发电量计算），其中欧洲、北美洲、南美洲、亚洲和非洲水电开发程度分别为 54%、39%、26%、20%和 9%，由于亚洲和非洲水电开发程度较低，所以亚洲和非洲是今后水电建设的重点地区。部分国家的水电开发程度为德国 74%、瑞士 92%、美国 67%、西班牙 67%、意大利 86%、日本 73%、中国 27.7%。如果以水电年发电量与经济可开发量中的多年平均年发电量的比值作为水电开发程度，则发达国家水电平均开发程度已在 60%以上，相应水电开发程度超过 95%以上的国家有德国、瑞士、西班牙、意大利，美国达到 95%，日本达到 90%。

表 3　水能资源经济可开发量前 10 位的国家

国　家	经济可开发量（亿 kW·h/a）	排序
中　国	17 530	1
俄罗斯	8520	2
巴　西	7635	3
加拿大	5360	4
美　国	3760	5
塔吉克斯坦	2635	6
秘　鲁	2600	7
挪　威	2060	8
埃塞俄比亚	1620	9
刚果（金）	1450	10

资料来源：英国《国际水电与大坝》杂志 2011 年发布的《World Atlas》，其中秘鲁和刚果（金）都取自 2009 年发布的《World Atlas》中数据。

发展趋势　世界上有 165 个国家已经明确将继续发展水电，其中 110 个国家规划新增建设规模达 3.4 亿 kW。北美和欧洲等发达国家因已基本完成水电开发任务，发展重点转移到对已建水电站的更新改造、增加水库的泄洪设施等，以提高防洪能力、调整电站运行调度、完善生态保护和修复措施。亚洲、南美洲等地区的多数发展中国家制订了发展规划，计划在 2025 年左右基本完成水电大规模开发任务。非洲等地区的欠发达国家，虽然拥有丰富的水能资源，且也一直积极致力于水能资源开发，但因资金、技术等条件限制，大力开发水电仍然有诸多困难。还有一些政局不稳定的国家，虽然急需发展水电，但限于国力条件，推进相对缓慢。今后 10～15 年，水电仍具有较大开发潜力，优先开发水电仍是发展中国家能源建设的重要方针。世界上水电开发将集中于亚洲、非洲等资源开发程度不高、能源需求增长快、经济欠发达地区。

shiliu

势流

（potential flow）　流场中流体微团不发生旋转且有势的流动形态。又称无涡（无旋）流动。势流的速度可用速度势函数 φ 的梯度来表示，如

$$u=\frac{\partial\varphi}{\partial x},\ v=\frac{\partial\varphi}{\partial y} \tag{1}$$

流场中存在势函数的流动，数学处理方法上称有势流动。势流中流体固有的黏性不起作用，所以理论上势流没有能量损失。势流是将实际流动理想化的一种模型，当流体黏性对流动的作用甚微或者可以忽略时，常把实际液体的流动当做势流处理（如溢流坝面或进水口的流场，除边界层部分外，可视为势流区），不仅在数学处理上有了重大简化，而且所得结果可相当准确地解释和解决许多具体的流动问题。

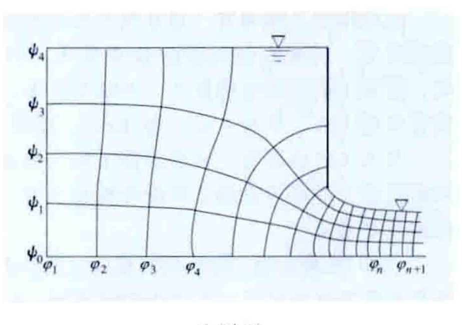
对势流的阐述和应用，通常限于恒定平面（二维）问题。以无涡为条件的平面势流场同时存在着速度势函数 φ（x，y）及与其正交的流函数 ψ（x，y），两者都满足拉普拉斯方程

$$\left.\begin{aligned}\frac{\partial^2\varphi}{\partial x^2}+\frac{\partial^2\varphi}{\partial y^2}=0\\ \frac{\partial^2\psi}{\partial x^2}+\frac{\partial^2\psi}{\partial y^2}=0\end{aligned}\right\} \tag{2}$$

因此，平面势流分析取 φ 或 ψ 为流场未知函数来替代通常采用的流场速度 u 或 v，使物理问题转化为在特定边界条件下解拉普拉斯方程的数学问题。势流计算广泛应用电子计算机求其数值解。

势流场中势函数 φ 和流函数 ψ 的正交性，适合数学中的柯西-黎曼（Cauchy-Reimann）条件，从而还可用复势 $W(z)=\varphi+i\psi$ 来表示势流场，用复变函数的方法处理。例如，保角变换（保角映射）法就是借助于图形相似与对应原理，用一些已知流场推导复杂流动的流谱。

对于水利水电工程中符合势流条件的流场，利用 φ 与 ψ 正交的原理用"流网法"绘出既定边界条件下 φ 和 ψ 的等值线，如图所示。流网是对流场简明的物理描述。φ=常数，为等势线；ψ=常数，为流线。流线与等势线互相垂直，网格为顶点正交的扭曲四边形。流网图中，相邻流线间通过的流量为定数。



流网图

势流和涡流是表征流体运动特性的一对专用名词。

参考书目

普朗特 L，等．流体力学概论．郭永怀，陆士嘉，译．北京：科学出版社，1981.

shigu zhamen

事故闸门

（emergency gate）　在其上（下）游发生事故时，能在动水中关闭，防止事故扩大的闸门。当需在限定时间内快速关闭时，也称快速闸门。待事故排除后，一般在静水中开启。

布置　事故闸门设置的数量视孔口数量、吊运条件和关闭时间等要求而定。有每孔设置一扇的配置，也有多孔合用一扇的配置。快速闸门需每孔设置一扇。

门型　事故闸门多选用平面闸门，支承结构通常采用滑道、滚轮和链轮等，以减小摩阻力。

启闭方式　为满足动水关闭的要求，事故闸门需有足够重量；重量不足时，可采用配置加重块、利用水柱重量或由启闭机施加下压力等措施。事故闸门为上游止水时，往往采取设置加重块或由启闭机械施加下压力的措施；事故闸门为下游止水时，一般利用水柱作为压重。同时，还应在闸门后设置足够面积的通气孔，以满足动水下门时门后的补气和启门前往门后充水平压时的排气要求。

为了在静水中开启事故闸门，启门前需向下游水道充水使闸门前后平压。事故闸门常用的充水方式有门叶结构上设置充水阀、门叶节间充水和闸墩内埋设旁通管道充水等方式。工程中以门叶结构上设充水阀的方式应用最广，此外也有采用小开度提起门叶的充水方式。事故闸门在启闭力计算中应核算闭门力、持住力和启门力，静水启门时的启门力计算应考虑一定的水位差。

shouzu rongliang

受阻容量 (resistance capacity; limited capacity; suffocated capacity) 见水电站额定水头。

shuniu gongcheng

枢纽工程 (complex project) 以水资源利用为目的，具有发电、防洪、灌溉、供水、排沙、通航、过鱼等功能，由挡（壅）水建筑物、泄水建筑物、输水建筑物、发电厂房、通航建筑物等组成的综合体。导流建筑物是枢纽工程施工的临时建筑物（见施工导流）。水电枢纽工程以发电为主。

水电枢纽工程类型 有常规水电站枢纽和抽水蓄能电站枢纽两类。常规水电站枢纽分为坝式、引水式和混合式3类。抽水蓄能电站枢纽有上、下两个水库，抽水发电厂房的布置有地下式、半地下式（竖井式）、地面式等类型。

坝式水电站枢纽 分为混凝土坝（砌石坝）枢纽、土石坝枢纽和土石坝与混凝土坝混合枢纽3类。建筑物一般集中在坝址处布置。

（1）混凝土坝（砌石坝）枢纽。其特点是可利用坝身泄洪和布设发电进水口、冲沙孔等建筑物。枢纽中泄水建筑物和水电站厂房的位置和形式有不同的组合。中国工程实例中常见的位置和形式组合有：洪水大、坝址河谷宽、水头较高，如长江三峡水利枢纽，河床坝身泄洪，坝后布置发电厂房、枢纽左侧布置升船机，距离左岸电站厂房约1200m布置双线五级连续船闸；洪水大、坝址河谷宽、水头较低，如葛洲坝水利枢纽，河床闸坝泄洪，河床式发电厂房，多线通航船闸；洪水较大、坝址河谷较窄，混凝土宽缝重力坝坝身泄洪，坝后式厂房顶溢流，如新安江水电站；空腹重力拱坝坝身泄洪，坝内式厂房，如凤滩水电站；拱型重力坝坝身泄洪（其中两侧两孔为滑雪道式），坝后式厂房前挑流，如乌江渡水电站；坝址河谷狭窄，地质条件好，如二滩水电站，高混凝土双曲拱坝坝身和泄洪洞泄洪，地下式厂房；洪水不太大，坝址河谷较窄，地质条件好，如东江水电站，混凝土双曲拱坝两侧布置潜孔滑雪道式溢洪道，坝后式厂房；坝址河道狭窄，岸边有合适地形布置泄水道和溢洪道，并利用导流洞改建成泄洪洞，发电厂房布置于坝后及岸边窑洞，如刘家峡水电站。

（2）土石坝枢纽。在顺直河段上的枢纽，泄水建筑物和水电站厂房等沿岸顺河布置，一般导流、泄水、引水系统等建筑物线路较长，在地质条件允许时多采用地下式厂房，如墨西哥的奇科阿森（Chicoasen）水电站（见图1）；在弯曲河段上利用凸岸布置导流建筑物和开敞式溢洪道，利用凹岸布置引水发电隧洞和地面厂房，如珊溪水电站（见图2）。

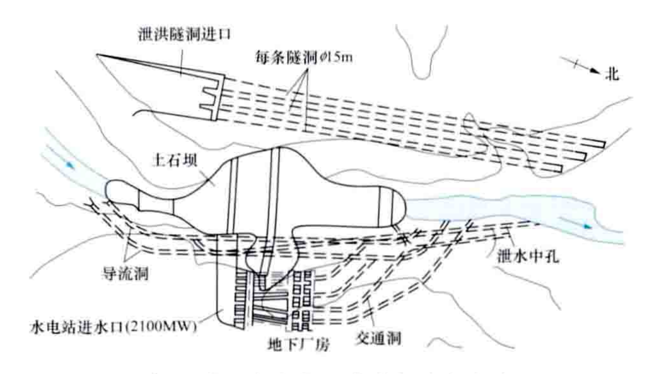


图1 土石坝枢纽（奇科阿森水电站）

（3）土石坝与混凝土坝混合枢纽。适用于宽河谷坝址。利用河床混凝土坝段布置泄水建筑物、引水系统、水电站厂房等，两岸布置土石坝，如巴西伊泰普（Itaipu）水电站。土石坝和混凝土坝的连接可采用插入式、侧墙式、插入与低挡墙组合式等。

引水式水电站枢纽 包括首部建筑物和厂房区建筑物两部分，一般首部建筑物和厂房区建筑物相距甚远，由引水道（隧洞、明渠、明管）相连。首部建筑物一般包括拦河闸（坝）、进水口、冲沙闸、沉沙池等。厂房区建筑物包括调压室（压力前池）、压力管道（隧洞）、水电站厂房、开关站、尾水渠（隧洞）等。引水式水电站枢纽，分为有压引水式和无压引水式两类。

（1）有压引水式。引水隧洞（或引水明管）内为有压水流，在它们的末端设调压室，下接压力管道（隧洞）。首部建筑物分为有水库的和无水库的两种。前者多建有较高的拦河坝，进水口附近设有冲沙底孔，如鲁布革水电站；后者多建较低的拦河闸（坝），进水口附近设有冲沙闸，如渔子溪

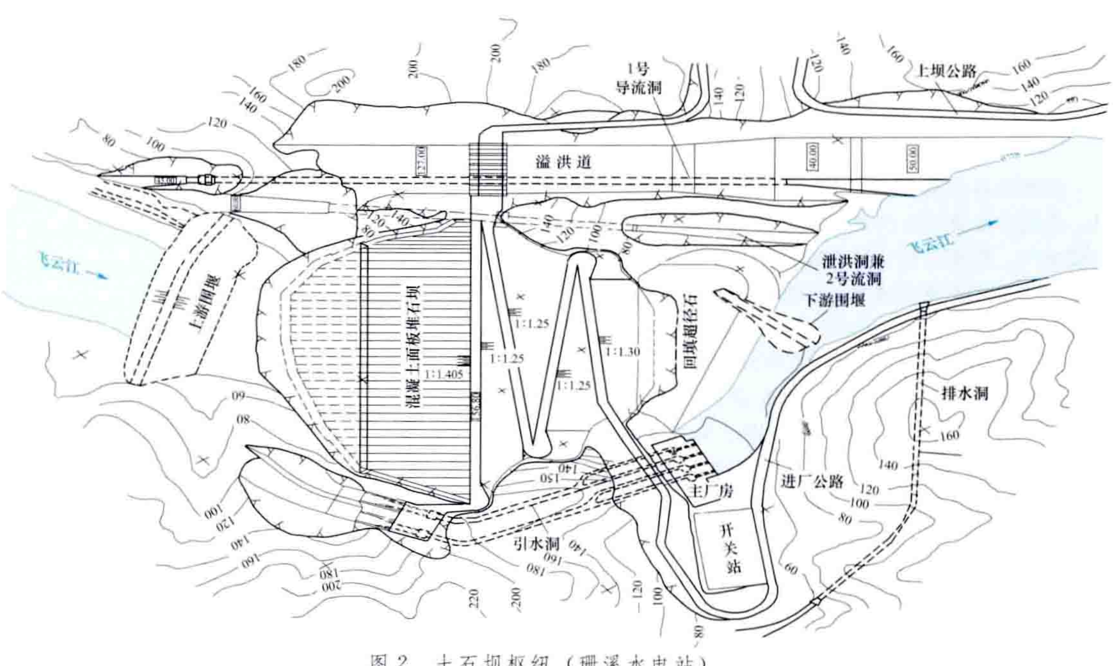


图2 土石坝枢纽（珊溪水电站）

一级水电站和锦屏二级水电站（见图3）。

（2）无压引水式。引水明渠或引水隧洞内的水流为明流。它们的末端设有压力前池，下接压力管道。首部建有拦河闸或低的溢流坝，进水口一般为开敞式。一般设有沉沙池。小型工程也有无坝引水的。

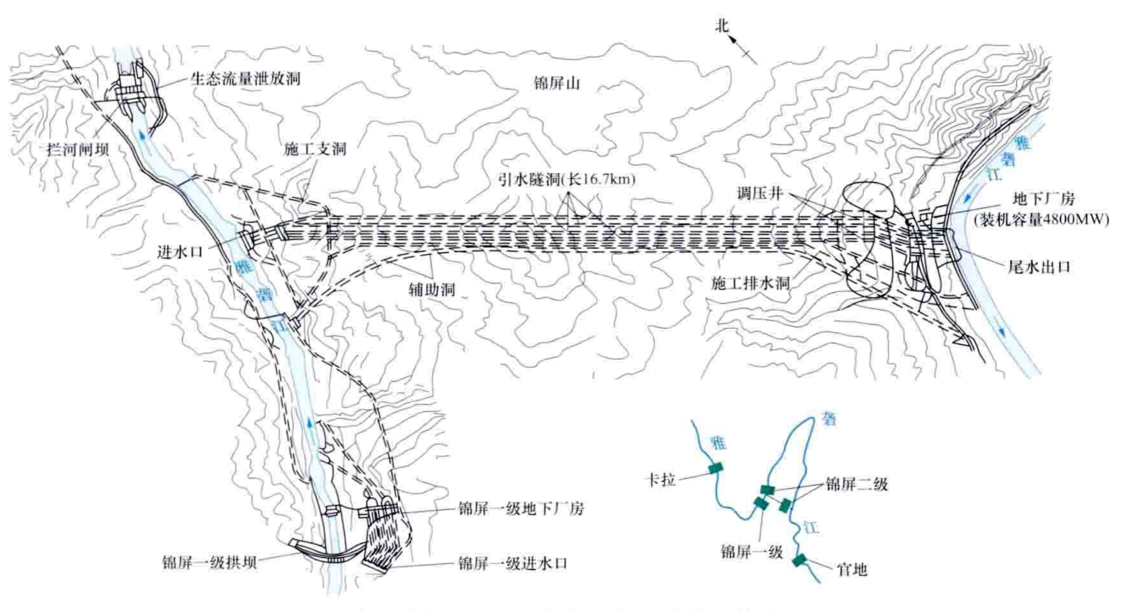


图3 有压引水式水电站枢纽布置（锦屏二级水电站）

混合式水电站枢纽 一般首部与厂房区相距不远，首部建有相对较高的拦河坝，并多利用河弯修建引水隧洞，以取得一定水头，如牛头山水电站（见图4）。

抽水蓄能电站枢纽 枢纽建筑物包括上水库、下水库、进（出）水口、输水系统、抽水发电厂房、补水工程等。

上、下水库一般在河流或沟谷筑坝形成。除设有进（出）水口外，还设有泄水、冲沙等建筑物。当水库以上径流很少时，也可不设泄水、冲沙建筑物。上、下水库需根据地形、地质条件，对坝基、库盆做好防渗、护坡和排水。输水系统上游调压室及尾水调压室的设置，根据抽水蓄能电站对水力机械过渡过程条件的要求确定。

厂房布置形式多为地下式（见天荒坪抽水蓄能电站）。整个输水系统及厂房均布置在地下。变压器场及开关站也多布置在主变压器洞内。按厂房在输水系统中的位置靠近上水库、在中部或靠近下水库，又可分为首部式、中部式、尾部式3种类型。

枢纽布置原则 水电枢纽的布置要因地制宜，既要满足枢纽的各项任务和功能的要求，又要适合枢纽区的地形、地质、水文、气象等自然条件，便于施工和导流，有利于节省投资和缩短工期。

（1）在洪水大的河流上要选好泄洪和导流的布置方式，它往往成为确定枢纽布置的重要因素。

（2）泄水建筑物的布置既要使其有足够的泄洪能力，还要有利于泄洪水流与河道中水流的衔接，能够妥善解决下泄水流的消能、防冲、防淤等问题，避免对岸坡和其他建筑物的安全和运行造成不利影响。混凝土坝枢纽泄水建筑物宜尽量布置在河床部位，只有当岸边有布置泄水建筑物的良好条件，或采用轻型混凝土坝，坝身不能大量泄洪时，才将主要泄水建筑物布置在岸边。土石坝枢纽尽可能以岸边溢洪道为主。在高山峡谷处开挖岸边溢洪道工程量过大，或可能引起较难处理的高边坡稳定问题时，也可采用泄洪隧洞为主。土石坝和混凝土坝混合枢纽一般将泄水建筑物布置在河床混凝土坝段。

（3）发电厂房宜布置在对外交通和出线方便的地方。有混凝土坝的枢纽，多布置在河床混凝土坝段。当河床没有足够的位置，或为了克服施工干扰和导流的困难，以及为了利用河道水头等目的时，也可采用岸边或地下厂房。

（4）导流建筑物要与永久水工建筑物相协调，并尽可能加以利用，将其改建为枢纽永久建筑物。枢纽永久建筑物的布置也要尽量结合施工导流和度汛的需要。

（5）通航建筑物布置在对上、下游航道和停泊区有利的一岸，并尽量与发电厂房分开布置，避免在运行中相互干扰。

（6）冲沙建筑物的布置要能冲走发电进水口前的淤沙。对汛期多泥沙河流，泄水建筑物的布置应使水库在汛期能保持低水位运行，以利于冲沙。

（7）水电枢纽各组成建筑物有时可以相互结合利用或重叠布置，如一洞（孔）多用，兼导流、泄洪、放水、冲沙、发电引水或尾水等多项功用，泄水建筑物与水电站厂房重叠布置等，以克服因坝址狭窄，布置水工建筑物前缘不足的困难，并可减少工程量。

图4 混合式水电站枢纽布置（牛头山水电站）

shuniu gongcheng touzi

枢纽工程投资 (cost of hydroproject) 直接用于水电站枢纽工程建设的费用。包括施工辅助工程、建筑工程、环境保护和水土保持工程、机电设备及安装工程、金属结构设备及安装工程五部分投资。枢纽工程投资是水电站工程投资的主要部分，一般占工程静态投资的60%以上。

shushui jianzhuwu

输水建筑物 (water conveyance structure) 从水库或河流至发电厂房，以及从发电厂房引至下游水库或河道的单向或双向取、引水的水工建筑物。输水建筑物由水电站进（出）水口、引水道、调压室（或压力前池）、压力管道，以及从尾水管至下游河道的尾水隧洞（或尾水渠）和尾水调压室等组成，习惯上发电厂房上游侧部分称为引水系统，厂房下游侧部分称为尾水系统。输水建筑物可分为坝式、无压引水式和有压引水式3种。

坝式　由有压进水口及压力管道组成，适用于坝后式、坝内式、溢流式等类型的水电站。一般一条压力管道供水给一台水轮机。水由有压进水口经压力管道引向水轮机。进水口位于坝的上游面，设有拦污栅、检修闸门、工作闸门。压力管道全部穿过坝体的称坝内埋管，如新安江水电站的压力管道；上部穿过坝体，下部安装于坝的下游面或坝体下游面的管槽内称坝后背管，如东江水电站和三峡水电站的压力管道；进水口后的压力管道沿坝上游面敷设，至靠近底部然后水平穿过坝体的称坝前引水管，如凤滩水电站的压力管道。坝式输水建筑物的纵剖面示意图分别见坝内埋管、坝后背管。

无压引水式　由开敞式进水口、无压引水道、压力前池和压力管道组成。适用于无压引水式水电站。水由开敞式进水口经明渠或无压隧洞引至压力前池，由压力前池分水，经压力管道引向水轮机。这种类型的厂房多为地面厂房，厂房下游设有尾水渠。

(1) 开敞式进水口。起取水作用，设有拦污栅和检修闸门。当泥沙入渠较多时，通常在进水口后设沉沙池及排沙设施。

(2) 无压引水道。可为明渠或无压隧洞，利用地形引水至压力前池形成落差。明渠常设置于地形平缓、沟壑较少、山坡稳定的地段。当引水线路遇到高山、陡坡、滑坡等地段时，常采用无压隧洞。

(3) 压力前池。位于无压引水道末端，起分配水量至压力管道的作用。它要有一定的容积，当负荷变化时可补充和蓄纳水量。根据需要设泄水道、排水道和排沙道等。

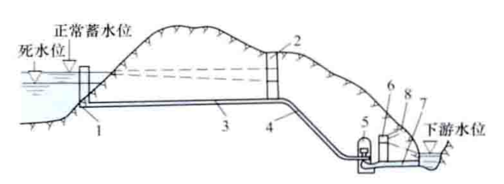
(4) 压力管道。根据地形、地质条件可为明管或隧洞，起引水作用。其进口应设拦污栅和事故闸门。布置形式有一条压力管道为一台水轮机供水或由一主管经支管向多台水轮机供水，支管上要设阀门，以利机组检修和运行。

有压引水式　由有压进水口、有压引水道和压力管道组成。当管道较长时，要设上游调压室。它主要适用于常规引水式水电站，如锦屏二级水电站（见枢纽工程），以及抽水蓄能电站（如广州抽水蓄能电站、天荒坪抽水蓄能电站），这类输水建筑物的纵剖面如下图所示。

(1) 有压进水口。作取水用，设有拦污栅、检修闸门或事故闸门。

(2) 有压引水道。有引水隧洞和引水明管、埋管等类型，它兼有形成落差和引水的作用，多分段直线布置，纵向坡度较缓。

(3) 调压室。设于引水道末端，有反射水击波、减小水击压力的作用。其断面要满足波动稳定要求，容积要满足负荷变化时储水和补水的要求。有时在调压室内要设事故闸门。



有压引水式输水建筑物纵剖面示意图

1—进水口；2—上游调压室；3—引水道；4—压力管道；5—水电站厂房；6—尾水调压室；7—尾水隧洞；8—通气竖井

(4) 压力管道。调压室下游为压力管道，其作用与布置和无压引水式相同。如为地下厂房，当尾水隧洞很长、尾水位很高时，还需设置尾水调压室。

shushui jianzhuwu weixiu

输水建筑物维修 (maintenance of water conveyance structure) 为保证输水建筑物的安全和正常运行而对其损坏部位进行维护、修复的工程措施。输水建筑物包括水电站进（出）水口、引水道、调压室（或压力前池）、压力管道，以及从尾水管至下游河道的尾水隧洞（或尾水渠）和尾水调压室等（见输水建筑物）。输水建筑物一般由混凝土和水工金属结构等构成。

见泄水建筑物维修。

shujing kaiwa

竖井开挖 (vertical shaft excavation) 地下垂直井筒的开挖施工过程。竖井开挖常用于水电站调压井、闸门井、出线井、通风井、压力管道等工程，一般采用钻孔爆破法施工，有全断面开挖和导井法开挖两种方法。

全断面开挖　按照设计断面自上而下或自下而上一次性开挖的方法。自上而下开挖时，先要锁好井口，防止坍塌和在施工中料物坠入井内。在围岩比较稳定而井下无施工通道的小竖井，一般用手风钻自上而下分段钻孔，分段爆破；或用钻机一次钻孔，分段爆破，爆后一次成型。用人力或装载机配吊桶井架提升石渣，自卸汽车或其他运输工具出渣。在围岩不稳定处，要随时实施锚喷支护或预灌浆加固围岩。遇不利节理、裂隙组合时，采用锚固或锚喷措施支护围岩。井深较浅而井底又有空间或通道的竖井，也有一次钻孔爆破成井或钻孔后自下而上分段进行爆破成井的全断面开挖。

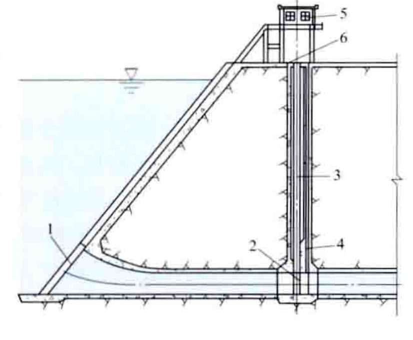
导井法开挖　断面面积大于$18m^2$的竖井通常采用的先开挖导井与井底出渣通道，导井贯通后再自上而下或自下而上分段扩挖至设计断面，由井底出渣通道出渣的方法。导井开挖方法通常有普通法、深孔法、钻井法、吊罐法和爬罐法等，导井断面面积宜为$4 \sim 6m^2$。①普通法。在竖井上部或下部搭设施工平台进行钻孔、爆破作业，劳动强度大、进度慢、通风排水困难，用于井深较浅、形状复杂或围岩稳定性差的导井开挖。②深孔法。自上而下钻孔径为100mm以上的平行深孔，自下而上分段爆破成型，适用于一般井深的导井开挖。③钻井法。用大直径（$\phi \geqslant 1m$）钻机一次钻孔成井，或使用反井钻循环机钻导孔，然后安装扩孔钻头自下而

上扩孔形成导井，适用于围岩岩性较均质且有大型反井循环钻机设备的导井开挖。④吊罐法：沿导井中心钻空孔后穿钢绳挂施工吊罐，施工人员在施工吊罐内自下而上分段、循环进行钻孔爆破作业，适用于围岩稳定性较差的导井开挖。⑤爬罐法。通常采用阿立马克爬罐（Alimak Lift）施工，阿立马克爬罐通过安装在平洞、竖井边墙上的轨道移动工作爬罐，人员在罐内作业，爬罐上升至工作面钻孔装药后，退回井底一侧避炮，然后爆破，适用于井深在300m内的洞室。

导井开挖后自上而下分段扩挖，石渣从导井溜下，下部设有棚架漏斗或用装载机装车输出，上部扩挖钻孔和下部出渣互不干扰。当采用自下而上扩挖时，可在导井内打略向下倾斜的辐射孔分段爆破、出渣。

shujingshi jinshuikou

竖井式进水口 （shaft intake） 将闸门布置于山体竖井中，入口与闸门竖井之间的流道为隧洞段的水电站进水口。根据对引水发电系统安全保护的要求，在竖井闸门室内布设检修闸门、事故闸门（或工作闸门）。拦污栅常布置在喇叭口的上游端，闸门竖井与喇叭口之间的隧洞连接段若较长，也可将检修闸门布置在喇叭口的上游侧；若连接段不长，则可在闸门井内紧靠事故闸门（或工作闸门）上游侧布置检修闸门。闸门检修平台位于最高库水位以上，见图。



竖井式进水口剖面图

1—拦污栅；2—闸门；3—闸门竖井；4—通气孔；5—启闭机室；6—检修平台

竖井式进水口与岸塔式进水口相比，具有结构简单、工程量较省，受风浪、冰冻的影响较小的特点，同时由于整个闸门井结构被浇筑在开挖的竖井内，结构的整体刚度大，受地震影响小，但对地质条件要求较高。

shulitongjifa jingliu tiaojie

数理统计法径流调节 （runoff regulation by mathematical statistics method） 根据实测（含插补延长）年径流资料，计算统计参数，推算径流理论频率曲线，应用概率组合原理，进行水电站水库多年调节的方法。多年调节水电站水库的调节周期较长，在有限的实测径流系列中，出现连续枯水年组为数不多，用时历法径流调节计算，其计算成果带有较大的偶然性。应用数理统计法，即使没有很长的径流系列，也可以根据概率的原理，组合出各种可能出现的连续枯水年组，以弥补这一缺陷。借用邻近河流的统计参数，也可对本河流径流的统计参数进行修正。数理统计法径流调节适用于径流资料短缺的河流，但是无法求得经调节后水电站的流量、水头、出力及库水位等，所以在水电站水能设计和运行中具有一定的局限性。

数理统计法进行多年调节，是将调节库容分为年库容和多年库容两部分。年库容是进行年内调节的库容，用于调节径流年内分配的不均衡性，起年调节的作用。多年库容是遇连续枯水年才消落的库容，用于调节径流年际间的不均衡性，起多年调节的作用。计算方法有 А. Д. 萨瓦连斯基（А. Д. Саваренский）法和 С. Н. 克里茨基（С. Н. Крицкий）М. Ф. 明凯里（М. Ф. Менкель）第一法、第二法等。

年库容计算 可分为简化法和组合法两类。

（1）简化法。假定同一个调节水（流）量所需的年库容与多年库容的关系非常密切。一般选用若干个年水量等于或接近于调节水（流）量的年份作为典型年，对各典型年用时历法进行一年的调节计算，求所需的调节库容，从各典型年中选出所需最大的库容即为年库容。

（2）组合法。假定同一调节水（流）量所需的年库容与多年库容无关，即认为调节任何一年年水量不平衡所需的库容都可能是水电站进行多年调节所需的年库容。因此，可以求出同一调节水（流）量历年所需的年库容后绘制频率曲线，与所需多年库容的频率曲线进行组合直接求出调节库容。

多年调节计算 其基本原理是：①依据全概率公式进行水库蓄水和年来水量概率组合而求得水库多年库容、调节水量和概率的关系；②径流调节是各态历经的过程（即遍历性），这种过程的特征是，从水库任何一个初始的蓄水状态开始，按同一规则进行径流调节，经过若干个调节周期后，水库蓄水的概率分布趋于稳定。

参考书目

电力工业部成都勘测设计院．水能设计．北京：电力工业出版社，1981.

shuangchong tiaojie

双重调节 （double regulation） 对水轮机的两个互相关联的执行机构进行的协调控制。轴流转桨式水轮机在运行中除了需要控制导叶以维持其转速为某一定值外，还需要控制桨叶角度，使水轮机高效率运行；装有调压阀的混流式水轮机在运行中除了需要控制导叶外，还需控制调压阀，以减小机组甩负荷时水轮机前压力管道内压力的变化；冲击式水轮机在运行中除了需要控制喷针外，还需控制折向器，以减小冲击式水轮机甩负荷时的转速升高。工程中采用双重调节调速器实现水轮机的双重调节。双重调节调速器由主调节和协调调节两大部分组成。主调节部分即导叶或喷针操作部分，协调调节部分主要由协调装置和液压随动系统组成。

转桨式水轮机的双重调节 转桨式水轮机的两个互相关联的执行机构是导叶接力器和桨叶接力器。转桨式水轮机最高效率时的桨叶角度与工作水头和导叶开度有关，这种桨叶角度与不同工作水头和不同导叶开度的对应关系叫做协联。实现协联的方式有机械协联和电气协联两种（见图1）。

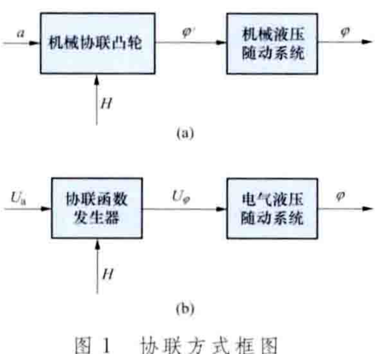


图1 协联方式框图

（a）机械协联；（b）电气协联

(1) 机械协联。机械协联方式框图见图 1 (a)，其输入量有导叶开度 a 和水头 H，输出量为 φ。这些量都是机械位移。协联关系由凸轮的形状保证。该方式下改变协联关系困难，凸轮制造也困难，协联精度不高。

(2) 电气协联方式框图见图 1 (b)，其输入、输出量均为电气量，U_a 为协联装置输入量，U_φ 为协联装置输出量，协联关系由电气协联函数发生器保证。电气协联函数发生器制造方便，协联关系调整、改变容易，通用性好，电液随动系统的误差较小。在微机调速器中，协联函数发生器可由计算机软件来实现，此时电气协联亦称数字协联。

装有调压阀的混流式水轮机的双重调节　装有调压阀的混流式水轮机的两个需互相协调的执行机构是导叶接力器和调压阀活塞。要求在机组甩负荷或紧急停机导叶快速关闭的同时迅速开启调压阀，下泄部分水量，保证压力水管内的水压力上升不致过高。出于安全性的考虑，还要求在调压阀万一失灵或拒动时，导叶接力器只能以允许的速度缓慢关闭。实现这种协调动作的常用方法是直接（或间接）应用缓冲器来控制调压阀的活塞（见图 2）。

冲击式水轮机的双重调节　冲击式水轮机的两个需互相协调的执行机构是喷针和折向器。正常运行时，根据喷嘴射流的直径控制折向器的位置，使其总是处于射流的边缘，但不接触射流的位置。当机组甩负荷时，折向器迅速切入射流，使水流的方向改变，不再射到水斗上，防止机组的转速过度升高。

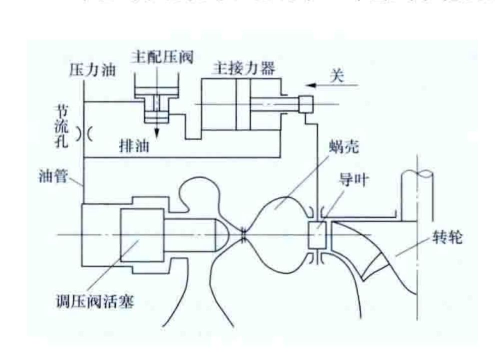


图 2　调压阀控制原理简图

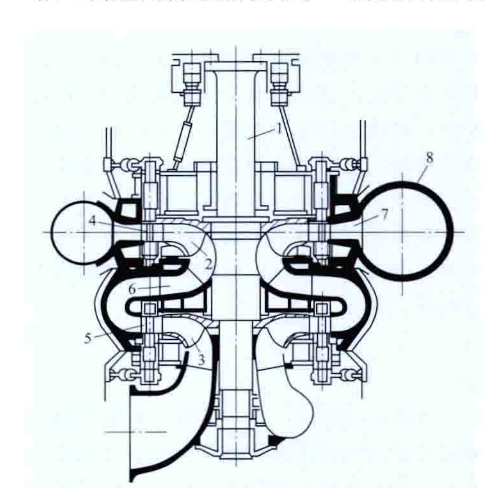
shuibeng-shuilunji

水泵水轮机　(pump-turbine)　既可正向旋转作为水轮机运行、将水流能量转变为旋转机械能，又可反向旋转作为蓄能泵运行、将旋转机械能转变为水流能量的水力机械。又称可逆式水轮机。水泵水轮机可分为混流式、斜流式、轴流式和贯流式，适用水头/扬程的范围不同。大中型抽水蓄能电站主要采用混流式水泵水轮机，潮汐电站一般采用贯流式水泵水轮机。

混流式水泵水轮机　分为单级式和多级式，以适应不同抽水蓄能电站的水头/扬程以及特定的运行要求。单级混流式水泵水轮机轴上只装有一个转轮，多级混流式水泵水轮机则装有 2 个（称为双级）或 2 个以上的转轮。单级混流式水泵水轮机的使用水头/扬程已达 700～800m，多级式则可用到 1000m 以上。最多的转轮级数为 7 级。

单级混流式水泵水轮机的结构及主要部件与常规的混流式水轮机基本相同。转轮的形状更接近水泵的叶轮，转轮外径比相同水头、输出功率下的常规水轮机外径大 30%～40%。以往由于技术原因，多级混流式水泵水轮机一般不设导水机构，随着技术的发展，也有多级水泵水轮机设置导水机构的，见图。

斜流式水泵水轮机　对于中、低水头/扬程的抽水蓄能电站，当水头/扬程变幅较大时，可采用斜流式水泵水轮机，其适应的水头/扬程范围为 12～150m。斜流式水泵水轮机的结构与斜流式水轮机基本相同。



双级混流式水泵水轮机结构图
1—主轴；2—第二级叶轮；3—第一级叶轮；4—第二级导叶；5—第一级导叶；6—整流叶片；7—座环；8—蜗壳

轴流式水泵水轮机　对于低水头/扬程的抽水蓄能电站，当水头/扬程变幅较大时，可采用轴流式水泵水轮机。轴流式水泵水轮机的结构与轴流式水轮机基本相同。

贯流式水泵水轮机　既可在两个流向发电，又可在两个流向抽水。又称双向可逆式水轮机。贯流式水泵水轮机的应用水头较低，通常用于潮汐电站，其结构与贯流式水轮机基本相同。

发展及使用现状　水泵水轮机技术始于 20 世纪 30 年代初期，50～60 年代使用范围不断扩大，随后得到迅速发展，水头、容量、比转速逐步提高。混流式水泵水轮机于 1931 年首次安装在意大利的格拉·拜顿水电站，单机容量为 0.6MW。抽水蓄能电站发展较快的是美国、日本和西欧各国，中国进入 21 世纪后，发展非常迅速。世界范围内已投入运行的机组中，使用水头最高的单级混流式水泵水轮机安装在日本的葛野川（Kazunogawa）抽水蓄能电站，水轮机工况的最大水头为 728m，最大输出功率 412MW；水泵工况的最高扬程为 778m，最大抽水流量 $56.7m^3/s$，转速 500r/min。该电站首台机组于 1999 年 12 月投入运行。世界上还有很多单机输出功率大的混流式水泵水轮机，如美国巴斯康蒂（Bath County）抽水蓄能电站的单级混流式机组额定工况输出功率 350MW，水轮机工况额定水头 329m 下水泵水轮机输出功率为 380MW；日本神流川（Kannagawa）抽水蓄能电站的单级混流式水泵水轮机在水轮机工况额定水头 653m 下的输出功率为 463MW；美国赫尔姆斯（Helms）抽水蓄能电站的单级混流式水泵水轮机在水轮机工况额定水头 495.3m 下的输出功率为 353.3MW；日本小仓（Kokura）抽水蓄能电站的单级混流式水泵水轮机在水轮机工况额定水头 448m 下的输出功率为 362MW。韩国襄阳水电站，装设 4 台单机功率为 250MW 的两级可调式抽水蓄能机组，电站净水头达 817m。

具有代表性的多级式水泵水轮机安装在意大利埃德罗（Edolo）抽水蓄能电站，其最高水头/扬程为 1256m/1289m，为应用水头/扬程最高的水泵水轮机，水轮机工况最大输出功率 128MW，5 级，转轮直径 2.215m，转

速 600r/min。单机输出功率最大的水泵水轮机安装在法国的勒·柯洛（Le Clou）电站，双级可逆式水轮机工况最大输出功率 286MW，水泵工况最大输入功率 244MW，最高水头/扬程为 1037m/1067m，转速 600r/min。使用水头最高的斜流式水泵水轮机安装在日本高根第一（Takane I）电站，最高水头/扬程为 136m/137m，水轮机工况最大输出功率 88MW，转速 277r/min。最大的贯流式水泵水轮机（灯泡式）安装在法国朗斯（La Rance）潮汐电站，最大输出功率 10MW，最高水头/扬程为 11m/6m。

中国抽水蓄能电站建设发展逐步加速，不仅抽水蓄能装机容量快速增长，而且设备的制造水平也取得了长足的进步。已投入运行的大型单级混流式水泵水轮机主要有：其中广州抽水蓄能电站的水泵水轮机，运行水头/扬程范围为 496～537m/514～550m，水轮机工况额定功率 306MW，转速 500r/min，转轮直径 3.886m（二期 3.865m）。天荒坪抽水蓄能电站的水泵水轮机，运行水头/扬程范围为 520～605m/533～615m，水轮机工况额定功率 306MW，转速 500r/min，转轮直径 4.08m。西龙池抽水蓄能电站的水泵水轮机，运行水头/扬程范围为 611.6～687.7m/626.9～703m，水轮机工况额定功率 306MW，转速 500r/min，转轮直径 4.27m。仙游、响水涧等抽水蓄能电站的机组均由中国自行设计生产和制造，且已投入运行，其中仙游抽水蓄能电站水泵水轮机的运行水头和扬程范围分别为 413.4～472.6m 和 424.1～479.9m，水轮机工况额定功率 306MW，机组额定转速 428.6r/min。

Shuibuya Shuidianzhan

水布垭水电站 （Shuibuya Hydropower Station）

位于中国湖北省巴东县，是清江干流梯级开发的龙头枢纽工程，距恩施市 117km。电站开发任务以发电为主，兼有防洪、航运等综合利用效益。装机容量 1840MW，多年平均年发电量 39.84 亿 kW·h，并可增加下游隔河岩、高坝洲水电站的保证出力及发电量。以 500kV 一级电压计入系统，500kV 出线 2 回，均接入华中电网，见图 1。



图 1　水布垭水电站

水文和水库特性　坝址以上流域面积 10 860km²，占全流域的 63.9%，多年平均流量 299m³/s，相应年径流量 94.4 亿 m³。1000 年一遇设计洪水流量 20 200m³/s，相应库水位 402.20m；10 000 年一遇校核洪水流量 24 400m³/s，相应库水位 404.00m；总库容 45.80m³；正常蓄水位 400.00m，相应库容 43.12 亿 m³；死水位 350.00m，相应库容 19.29m³；为多年调节水库。

坝址地质条件　坝址基岩为二叠系下统栖霞组、茅口组灰岩及上统龙潭组页岩、泥灰岩，厂房尾水及溢洪道下游消能区为泥盆系及石炭系砂页岩、白云岩等。坝区断层、裂隙发育，岩石完整性较差。坝址区地震基本烈度为Ⅵ度，设计烈度为 7 度。

枢纽布置　枢纽工程由大坝、泄水建筑物、引水发电系统等组成，见图 2。

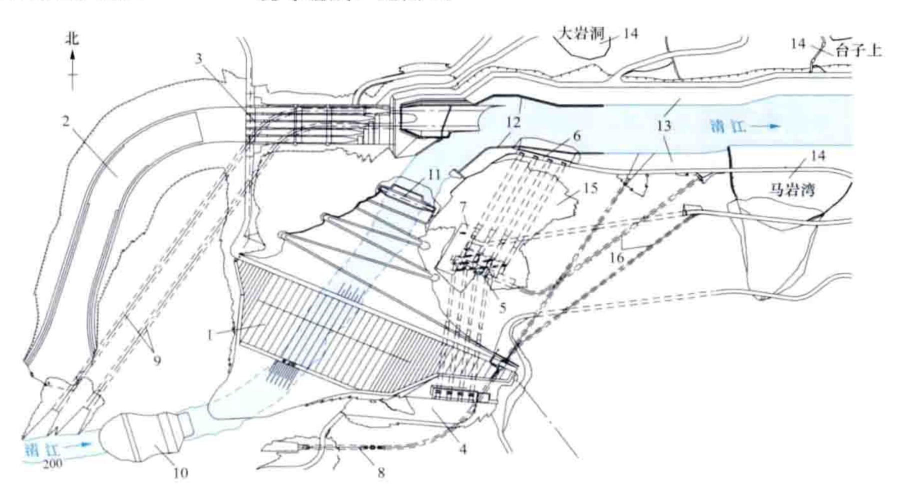


图 2　水布垭水电站枢纽布置

1—大坝；2—溢洪道引水渠；3—表孔溢洪道；4—电站引水渠；5—地下厂房；6—尾水平台；7—500kV 变电站；8—放空洞；9—导流洞；10—上游土石围堰；11—下游 RCC 围堰；12—防淘墙；13—下游护岸；14—滑坡体；15—高边坡；16—交通洞

大坝　混凝土面板堆石坝，坝顶高程 409.00m，最大坝高 233m，为世界上已建最高的混凝土面板堆石坝。坝顶长 674.66m，坝顶宽 12m，最大底宽 637.6m，上游坡坡度为 1∶1.4，下游平均坝坡坡度为 1∶1.46，填筑方量为 1567.6 万 m³；筑坝材料主要为灰岩，河床部分砂卵石经强夯后成为坝体的一部分。混凝土趾板基础大部分为栖霞组灰岩，极少部分为龙潭组岩石，趾板厚 0.6～1.2m，外部趾板宽 6～8m；内部防渗板宽 4～12m，厚 0.5m 混凝土面板宽度中间为 16m，两侧为 8m，厚度为 0.3～1.1m，面板面积 13.87 万 m²。

泄水建筑物　溢洪道布置在左岸，设 5 个表孔，孔口尺寸为 14m×21.8m，设计和校核洪水条件下，下泄流量分别为 16 300m³/s 及 18 280m³/s；采用挑流＋水垫塘消能，挑流鼻坎形式为阶梯式窄缝，收缩比为 0.25，水垫塘采用护坡不护底的做法。右岸设有一个最大工作水头为 110m、最大泄量为 1605m³/s 的放空洞，采用挑流消能。

引水发电系统　位于右岸，进口为塔式进水口，单机单洞引水，地下厂房尺寸为 168.50m×23.00m×65.47m（长×宽×高），厂房内装有 4 台混流式水轮发电机组，单机容量 460MW。水轮机额定水头 183.5m，额定转速 150r/min，额

定流量 277.6m^3/s。发电机为立轴半伞式结构，额定功率因数 0.9，额定电压 20kV。

工程施工 电站于 2002 年 1 月开工。导流采用导流隧洞加过水围堰的全年导流方式。工程于 2002 年 10 月下旬截流，2007 年 7 月第一台机组发电，2008 年 8 月 4 台机全部投产发电。

主要工程量：土石方明挖 2009 万 m^3、洞挖 181.2 万 m^3，土石方填筑 1639.6 万 m^3，混凝土填筑 196.47 万 m^3，钢筋 79 326t，钢材 17.77 万 t，帷幕灌浆 31.31 万 m，固结灌浆 16.11 万 m，金属结构安装 1.855 万 t。

设计单位 长江委长江勘测规划设计研究院（现长江勘测规划设计研究有限责任公司）。

建设单位 湖北省清江水电开发有限责任公司。

shuidian fazhan guihua

水电发展规划 (hydropower development planning)

为合理利用水能资源，根据规划范围内各类能源资源量及其分布和开发条件，社会经济发展、环境保护和节能减排需求等情况，确定规划期内合理的水电建设和利用时序方案。

水电发展规划范围为国家或地区。如果某些地区在水电的建设和利用上有较大关联，这些地区应统一进行规划。水电发展规划分短、中、长期发展规划，因水电工程前期工作及建设周期较长，一般 5 年及以下的称短期规划，5～15 年的称中期发展规划，15 年以上的称长期发展规划。中国制订的“十二五”水电发展规划即为短期规划，2020 年、2030 年水电发展规划即为中、长期规划。

水电发展规划的工作内容主要包括：①根据规划区域经济社会发展要求，能源资源条件，分析水电开发利用开发现状和存在问题，研究未来水电开发利用的意义，确定水电发展规划的指导思想、规划原则；②根据规划区域内各河流水电规划成果，相应水电项目的技术经济指标、前期工作情况，分析水电开发利用条件，开发潜力；③根据国民经济发展规划、节能减排目标和电力系统电源结构合理组成，分析对水电发展的要求；④根据水电开发条件及潜力，结合对水电开发的需求，提出水电发展目标及其总体布局；⑤提出水电合理开发建设和利用时序方案，对重要水电项目进行功能定位，对于从本地区长距离输出的水电项目，需研究提出合理的消纳方案；⑥分析规划方案实施所面临问题，提出相应的保障措施；⑦匡算规划期内的投资，分析水电开发利用产生的效益及其社会、生态环境影响等。

shuidian gongcheng jishu

水电工程技术 (hydropower engineering technology)

应用于水能资源开发利用的规划、勘察、设计、施工、制造、安装、科研以及运行管理的诸多现代科学技术的总称。涵盖坝工技术、泄洪消能技术、引水发电技术等各个方面。

坝工技术 在河道或山谷中，修建拦截水流、抬高水位、调蓄水量的挡水建筑物的现代工程技术。修坝建库的目的一是壅高水位、聚集水头，二是拦水蓄水、调节径流。坝型和坝高是坝工技术的主要特征，需要在前期工作中，根据工程规划所确定的开发目标和任务，综合分析河流水文情势、水能资源特点、水库淹没、环境影响和坝址地形地质条件等因素，通过多方案研究比较，综合权衡技术可行性和经济合理性加以确定。早期建坝，受技术条件和经济实力的制约，大多采用低坝（坝高小于 30m）、土石坝坝型；在经验积累、技术发展之后，逐渐向中坝、高坝方向发展并创建了一系列新的坝型。常用的坝型有土石坝、混凝土重力坝、混凝土拱坝、碾压混凝土坝、土心墙堆石坝、混凝土面板堆石坝等。中国是世界上建坝数量最多的国家，也是高坝建设最多的国家，特别是近 30 年，坝工技术快速发展，建成和正在建设一批 300m 级的高坝。

泄洪消能技术 设置泄流通道，满足洪水泄放、径流调节与水位控制要求，消耗下泄水流能量，减轻下游河道冲刷和水面波动的工程技术。泄流通道分为坝身泄流和岸边泄流。泄流通道及其下游出口的消能工称为泄水建筑物。泄水建筑物下泄水流一般具有较高流速，挟带较大能量，若不采取有效措施消除水流动能，势必刷深河槽，冲刷河岸，甚至影响大坝、发电厂房、通航建筑物以及泄水建筑物本身的安全。因此，泄水建筑物设计应满足：① 泄洪组合方式灵活，泄流能力满足设计标准的要求；② 进出口水流顺畅，水流平稳，能够减轻下游河道冲刷；③ 泄洪不致对其他建筑物的施工和运行造成不利影响；④ 泄水建筑物结构安全可靠，闸门启闭操作灵活方便；⑤ 对高速水流，还应避免空化、空蚀和满足抗冲耐磨要求。

中国长江三峡水利枢纽采用坝身泄洪、表孔深孔挑流消能，最大泄洪量 102 500m^3/s，泄洪水头 97.3m。澜沧江糯扎渡水电站采用岸边溢洪道泄洪，挑流及水垫塘消能，最大泄流量 35 300m^3/s。金沙江向家坝水电站采用坝身泄洪，底流消能，最大泄洪量 48 660m^3/s，泄洪水头 85.3m，下泄水流总功率 40 000MW。这些工程的泄洪规模大，条件复杂，泄洪消能技术具有世界先进水平。

引水发电技术 将水流落差所蕴藏的能量转变成电能的一系列建筑物及其设施设备系统技术的总称。引水发电系统建筑物包括电站进水口、引水系统（引水渠、引水隧道、高压管道）、发电厂房、调压井、尾水管、尾水隧洞（尾水渠）、尾水出口。引水发电系统中生产电能的动力设备是水轮发电机组，安装水轮发电机组及其辅助设备并为其安装、检修、运行及管理服务的建筑物是发电厂房。根据厂房位置及其结构形式，发电厂房分为河床式厂房、坝后式厂房、坝内式厂房、岸边式厂房、地下厂房和半地下厂房等类型。

长江三峡水利枢纽厂房分设左岸、右岸，由左岸坝后厂房、右岸坝后厂房及右岸地下厂房组成。坝后厂房主要建筑物包括坝式进水口、引水压力管道、厂坝平台、坝后厂房、尾水渠、尾水平台等，因为机组台数多达 26 台，两岸厂房各设有 3 个安装场。坝后式厂房的主厂房内安装混流式水轮发电机组，大小桥式起重机；上游副厂房布置中央控制室、主变压器和 GIS 及配电盘柜；下游副厂房布置水处理设备及通风、消防设备；机组油气系统则布置在主厂房安装场的下部；尾水平台布置检修闸门及门式启闭机。

shuidian guihua huanjing yingxiang pingjia

水电规划环境影响评价 (environmental impact assessment of hydropower planning)

在现状调查的基础上，预测评价水电规划的规模、布局、开发时序等所带来

的累积的、叠加的、长期的环境影响。水电规划环境影响评价是水电规划工作的重要组成部分，它可有效地协调水电开发与环境保护的关系，使水电开发河段可持续发展。其目的是贯彻全面协调、统筹兼顾、保护生态、发挥综合效益的原则。主要内容包括流域环境状况调查，水电规划分析，水电规划环境影响预测评价，环境保护对策措施及建议，环境监测、管理与跟踪评价，公众参与和结论。

流域环境状况调查　基本摸清水电规划所在流域地区的环境本底，重点是流域水域及其两岸的生物多样性状况及生态系统完整性等，掌握水环境及与水环境密切相关的环境因子的基本特征，了解水电规划所在河段以及整个流域的敏感环境问题。

水电规划分析　在规划方案的基础上分析水电规划与法规的符合性、与国家宏观政策的符合性、与流域综合规划的符合性，以及与同一层次相关专业规划和下层规划的协调性。

水电规划环境影响预测评价　梯级电站联合运行的相互关联、累积影响以及环境因子之间的关联影响是重点评价的内容，包括水环境、水域生态环境、陆地生态环境和社会环境，具体预测评价内容为水电开发对流域水文泥沙情势和水资源利用的影响，对流域水质和水温的影响，对水域生境条件和鱼类的影响，对陆生生态系统完整性的影响，对植被、植物和动物的影响，对生态敏感区的影响，对社会经济发展的影响，移民安置环境影响，可持续发展影响和对景观旅游资源与文物古迹的影响等。通过水电规划环境影响评价，明确指出水电规划开发的重大环境影响和环境可行的规划方案。

环境保护对策措施及建议　对涉及水电规划流域层面全局性的、宏观的、单个水电工程难以解决的、累积性的影响，规划相应的保护对策措施，或提出原则性的建议，并提出相应的投资估算，为流域水电开发环境管理提供依据。对策措施包括规划方案的完善、改进措施以及开发中应采取的对策措施等两方面内容，应协调好工程建设、资源利用与环境保护的关系，促进流域、区域的可持续发展。

环境监测、管理与跟踪评价　根据规划方案环境影响特点及规划环境影响评价的不确定性、开发时序等，提出环境监测规划。监测因子以具有积极性、长期性、综合性及制约性的因子为主，通过跟踪监测与调查，及时掌握规划及影响波及范围内水质、陆生生物、水生生物、社会经济等主要环境要素在规划实施前、后的变化情况和规律；根据环境监测结果，评价规划方案实施后的实际环境影响，监督规划环境影响评价所提出的减缓措施是否得到有效的贯彻实施，并根据实际影响确定为进一步提高规划的环境效益所需的改进措施，总结规划环境影响评价的经验和教训。

公众参与　水电规划环境影响评价公众参与调查对象包括相关行业部门、敏感区域主管部门、科研院所、权威专家及主要影响单位和个体代表等。参与方式包括座谈会、专家咨询、发放调查表及现场访谈等形式。参与的内容包括公众对水电规划方案的意见、公众关心的主要环境现状问题、水电规划方案实施可能引发的主要环境影响问题、环境保护对策措施和建议等。

结论　包括规划背景、规划的主要内容、评价过程、环境现状、环境影响预测评价、推荐的规划方案、环境保护对策措施、公众参与的主要意见和处理结果、总体评价结论及建议等。

shuidian huanjing yingxiang

水电环境影响　(environmental impact of hydropower development)　水电开发建设对周边环境可能产生的作用。水电环境影响按环境组成类别可分为自然环境影响和社会环境影响，按环境影响的性质可分为有利环境影响和不利环境影响。

自然环境影响　包括水环境影响、生态环境影响、局地气候影响、环境地质影响、环境空气影响、声环境影响、固体废物影响、土壤环境影响、水土流失影响等。

水环境影响　见水环境影响。

生态环境影响　对生态系统的结构和功能、构成该系统的生物因子和非生物因子所产生的影响，包括陆生生态影响、水生生态影响。

局地气候影响　见局地气候影响。

环境地质影响　主要包括水库浸没和矿产淹没、水库诱发地震、水库渗漏、地下水位变化和水库库岸稳定性等方面。

环境空气影响　电站建设过程中产生的粉尘、二氧化氮、一氧化碳和烃类等污染物对周边大气环境的影响，其中以粉尘污染为主。

声环境影响　电站建设对周边声环境质量以及环境保护对象的噪声影响。噪声来源有固定声源和流动声源两类，施工工厂运行、爆破等属固定声源，交通运输属流动声源。

固体废物影响　电站建设和运行过程中生产的废渣（如废料、废油、残渣等）和生活垃圾，处置不当会对地表水体、环境空气、土壤、地下水、景观及人群健康等产生不利影响。

土壤环境影响　电站建设过程中及水库蓄水对土壤结构及理化性质产生的影响。

水土流失影响　在水电站施工准备期、建设期及自然恢复期间，由于土石方开挖利用及弃渣等活动，水土资源和土地生产力在外营力作用下产生的破坏和损失。水土流失强度分为微度、轻度、中度、强度、极强度、剧烈等六级。

社会环境影响　见社会环境影响。

有利环境影响　水电站建设可促进城镇化建设和经济发展，具有防洪抗旱效益、减排效益，以及调水调沙、补淡压咸、改善下游河道水质、防凌、增加旅游资源、湿地保护和改善航运条件等作用。

促进城镇化建设和经济发展　水电站建设过程中，对工程所在地区投入大量资金，增加税收和就业，改善当地交通和供电等条件，电站周围形成新的城镇及工业区，带动水泥、钢材、木材及机械制造等产业的发展。

防洪抗旱效益　见防洪抗旱效益。

减排效益　见减排效益。

调水调沙　利用水电站设施和调度手段，通过加大水流冲刷，将水库或河床淤积的泥沙适时送入下游或大海，从而减小水库有效库容的淤损和库尾泥沙淤积回水的淹没影响，以及提高下游河道主槽的行洪能力。

补淡压咸　见补淡压咸。

改善下游河道水质　水电站水库的调节作用，可有效调整坝下流量的时空分布，使得枯水期流量增大，或遇特殊污染情况时合理安排下泄流量，提高河流稀释自净能力，改善水质。

防凌　高寒地区河流冬春季易遭受冰凌灾害，冰凌有时可聚集成冰坝或冰塞，引起江河水位暴涨导致漫滩或决堤。水电站建成后通过控制下泄流量，可有利于缓解或消除冰凌灾害影响。

增加旅游资源　水电站工程的兴建，将呈现出秀丽的湖泊自然风光和宏伟的水电枢纽建筑，可增加新的旅游资源。如中国浙江新安江水电站形成的千岛湖已成为闻名遐迩的旅游休闲度假胜地。

湿地保护　见湿地保护。

改善航运条件　水电站工程的建设抬高河道水位，使不通航的急流浅滩变成静水湖泊，改善库区河段的航运条件。同时通过水库调度削减洪峰流量，增加枯水流量，也可提高下游河道的通航保证率。

不利环境影响　主要体现在水环境影响、陆生生态影响、水生生态影响、环境空气影响、声环境影响、水土流失影响、固体废弃物影响和社会环境影响等方面。水电建设的不利环境影响要按施工期和运行期分别进行预测评价，并提出对策措施。

shuidian huanjing yingxiang pingjia

水电环境影响评价

(environmental impact assessment of hydropower development)　对河流水电规划、水电站建设过程中及建成后可能造成的环境影响进行预测和评价，提出预防或减轻不良影响的对策措施，进行跟踪监测的方法和制度。

水电开发实施分规划、设计、建设、后评价等阶段，河流（河段）水电规划阶段应开展水电规划环境影响评价，水电站可行性研究设计阶段需开展水电站环境影响评价，水电开发后可开展水电开发环境影响后评价。

评价内容　主要包括自然环境的影响评价、生态环境的影响评价、社会环境的影响评价、移民安置区环境影响评价和其他环境影响评价五个方面。

自然环境影响评价　主要评价内容包括对地质、地貌、水域形态、水文及泥沙情势、水温、水质、空气及声环境的影响评价。

生态环境影响评价　分为陆生生态环境影响评价和水生生态环境影响评价。陆生生态环境的影响评价主要包括对土地利用和景观空间格局，植被，动、植物物种多样性，土壤，水土流失，景观和生态系统完整性等的影响。水生生态环境影响，包括对水域形态、鱼类、其他水生生物、水生生态系统完整性等的影响。

社会环境影响评价　主要评价内容包括对社会经济、土地和水资源利用、基础设施、矿产、文物景观、人群健康和生活质量等的影响。

移民安置区环境影响评价　主要评价内容包括移民安置环境容量、移民安置区（点）环境适宜性、移民安置对土地资源、生态环境、环境质量、社会经济等的影响。

其他环境影响评价　部分水电工程由于地理位置、工程特性和规模不同，还包括对景观文物、固体废弃物、局地气候、地质环境等的影响。

中国环境影响评价发展历程　中国环境影响评价发展可分为引入和确立、规范和建设、强化和完善阶段、提高和拓展4个阶段。

引入和确立阶段　1973年第一次全国环境保护会议后，环境影响评价的概念开始引入中国。1979年9月，《中华人民共和国环境保护法（试行）》颁布，标志着中国的环境影响评价制度正式确立。其中规定：一切企业事业单位的选址、设计、建设和生产，都必须注意防止对环境的污染和破坏。在新建、改建和扩建工程中，必须提出环境影响报告书，经环境保护主管部门和其他有关部门审查批准后才能进行设计。

规范和建设阶段　环境影响评价制度确立后，相继颁布的各项环境保护法律、法规对环境影响评价进行规范，并通过部门行政规章，逐步明确了环境影响评价内容、范围和程序，环境影响的技术方法也不断完善。1989年12月颁布的《中华人民共和国环境保护法》，为行政法规中具体规范环境影响评价制度提供了法律依据和基础。

强化和完善阶段　从1989年12月颁布《中华人民共和国环境保护法》到1998年国务院颁布《建设项目环境保护条例》，是建设项目环境影响评价强化和完善阶段。1998年11月，国务院253号令颁布实施《建设项目环境保护管理条例》，这是建设项目环境管理的第一个行政法规。1999年3月，国家环保总局颁布第2号令，公布《建设项目环境影响评价资格证书管理办法》；同年4月，《关于公布建设项目环境保护分类管理名录（试行）的通知》公布了分类管理名录。

提高和拓展阶段　2002年10月，第九届全国人大常委会通过《中华人民共和国环境影响评价法》，环境影响评价从项目环境影响评价扩展到规划影响评价。

中国历来重视水电开发中的生态环境保护问题。自20世纪80年代初，在一些已建水利水电工程环境影响回顾评价的基础上，探索性地开展了水电工程环境影响评价。到80年代后期，大、中型水电建设项目基本纳入环境管理轨道，建立了比较健全的管理程序和环境影响评价技术标准体系。

shuidian jidi

水电基地

(hydropower base)　中国对水能资源富集、可规模性开发大中型水电站群的河流（河段）或地区的一种专称。中国水能资源丰富，主要分布于西部地区一些大江大河的干流及其主要支流，可以建设一系列规模巨大的梯级水电站，除向当地提供能源和电力外，还可向东中部缺能地区远距离送电；东中部地区一些省份水能资源相对较丰富，也有条件建设一批大中型水电站，作为当地电力系统的重要电源。

1979年，中国电力工业部根据中国水能资源的分布情况、开发条件和国民经济发展的需要，从水电开发战略角度出发，提出集中建设金沙江、雅砻江、大渡河、乌江、长江上游、南盘江红水河、澜沧江、黄河上游、湘西、闽浙赣等10个大型水电基地的设想方案，编写了《十大水电基地开

发设想》。1989年，中国能源部、水利部水利水电规划设计总院根据实际情况，增加了东北及黄河中游北干流两个水电基地，编印了《十二大水电基地》。1994年，又根据新的河流规划和勘测设计成果，补充、修正了十二大水电基地的规模和开发情况，并刊印于《中国大中型水电站规划图集》。根据怒江水电规划成果和2006年完成的雅鲁藏布江下游水能资源考察报告，水电基地中又增加了怒江和雅鲁藏布江下游两大水电基地，形成了十四大水电基地。

十四大水电基地的总装机容量为397 420MW，多年平均年发电量17 374亿kW·h，占中国水能资源技术可开发量的65%以上。截至2012年底，已建、在建规模为172 980MW，多年平均年发电量7276亿kW·h，分别占总装机容量的43.5%和41.9%，见表。

中国十四大水电基地情况汇总表

序号	基地名称	范围	规划开发规模		2012年底已建、在建规模	
			装机容量(MW)	年发电量(亿kW·h)	装机容量(MW)	年发电量(亿kW·h)
1	长江上游	长江干流宜宾至宜昌河段及支流清江	34 000	1430	28 510	1139
2	金沙江	干流巴塘河口至宜宾河段	77 000	3530	32 760	1649
3	澜沧江	干流西藏昌都县城以下至出境处河段	31 400	1440	15 700	729
4	雅砻江	干流两河口以下河段	26 000	1250	14 700	758
5	大渡河	干流双江口以下河段	26 400	1170	17 350	806
6	乌　江	干流全河段及北源六冲河	11 400	400	11 100	387
7	南盘江、红水河	黄泥河及干流天生桥至长洲河段	15 700	640	12 680	560
8	黄河上游	干流青铜峡以上河段	25 300	930	15 280	518
9	黄河中游北干流	干流托克托县至禹门口河段	5900	175	1630	47
10	湘　西	湘、资、沅、澧水及其支流	9000	310	7790	268
11	闽浙赣	闽、浙、赣三省等主要河流	11 100	310	8890	244
12	东　北	黑、吉、辽三省等主要河流	18 600	535	6590	171
13	怒　江	干流西藏索县西昌乡以下至出境处河段	36 000	1780	0	0
14	雅鲁藏布江下游	干流米林以下至墨脱县希让村河段	69 620	3474	0	0
合　计			397 420	17 374	172 980	7276

shuidian kaifa huanjing yingxiang houpingjia

水电开发环境影响后评价 (post evaluation of environmental impact of hydropower development) 水电开发后环境影响的回顾性评价。水电开发环境影响后评价是以过去的环境影响评价工作为基础，以水电开发建成后的实际环境现状为依据，通过评估水电开发前后污染物排放、生态变化规律及成因，反映水电开发对环境的实际影响程度和环境保护措施的有效性等。

水电开发环境影响后评价可以分析电站实施前环境影响预测结果和决策的准确性和合理性，有利于总结水电工程环境变化的规律，充分发挥工程的有利环境效益，为改进环境管理提供科学依据，提高环境管理和环境决策水平，对提高今后水电工程环境影响评价和环境管理水平有重要意义。

水电开发环境影响后评价需重点分析工程运行后水资源、土地资源开发利用的合理性，生态需水保障程度、水环境质量变化状况、水土流失防治、生态系统稳定性维护、污染防治与生态保护实施的有效性，在此基础上总体评价区域环境质量变化、生态功能发展趋势。综合分析工程实施对区域生态、环境与经济社会协调可持续发展的影响。提出工程建设的环境合理性和环境保护措施的实施效果，产生的环境问题及原因，环境保护和管理方面的成功经验，工程运行环境管理调整和环保措施改进建议。

水电开发环境影响后评价有针对水电工程的环境影响后评价，也有针对流域（河段）梯级开发的环境影响后评价。

水电工程开发环境影响后评价　针对具体某个水电工程开发进行的环境影响后评价。单个水电工程开发环境影响后评价随工程规模、特性、所在区域环境状况的不同而有所不同，一般包括对水文情势、水温水质、水库地震和库岸稳定、陆地生态、水域生态、土壤环境、农业生态、下游生态环境、局地气候、移民安置环境、区域经济、旅游景观、人群健康、环境管理等的影响。

流域（河段）梯级开发环境影响后评价　针对某河流或河段多个水电站开发的环境影响后评价。流域（河段）梯级开发环境影响后评价注重对流域性宏观影响研究，主要从规划的布局、开发规模、开发方式、开发时序等方面研究水电开发对流域可持续发展能力、环境承载力、资源可持续利用、经济社会发展和生态保护战略的宏观性影响及保护对策。流域（河段）梯级开发环境影响后评价需重点评价整体性较强、影响范围较广、时段较长并有累积性影响特征的环境要素。流域（河段）梯级开发环境影响后评价一般选择不同历史时期建设的老、中、新电站，以及不同调节性能的电站开展重要环境要素或因子的评价。

shuidian qianqi gongzuo

水电前期工作 (preliminary work of hydropower project)

河流水电规划、水电项目预可行性研究、可行性研究（包括有关专项评价论证工作）以及进行现场施工前期准备等工作的总称。

河流水电规划的主要内容包括：初步查明河流水能资源及开发条件；调查和研究影响河流水电开发的重大工程地质问

题；识别河流水电开发在生态环境和经济社会方面的限制性因素；明确河流水资源开发利用方向和开发任务；推荐开发方案，提出河流水电规划实施意见。中国能源行业提出的DL/T 5042—2010《河流水电规划编制规范》规定了河流水电规划的原则、内容、工作深度和技术要求，以及规划报告的编写要求。

预可行性研究主要内容包括：论证工程建设的必要性；基本确定工程开发任务；初步查明工程站址的主要地质条件；初步选择电站装机容量和水库正常蓄水位等工程规模参数、代表性坝（厂）址和枢纽布置及主要建筑物形式、主要机电设备；提出控制性工期、移民安置初步规划；估算工程投资；进行初步经济评价。中国能源行业提出的DL/T 5206—2005《水电工程预可行性研究报告编制规程》规定了预可行性研究的原则、内容、工作深度和技术要求，以及预可行性研究报告的编写要求。

可行性研究是在预可行性研究的基础上，进行补充、复核、完善、深化的过程，主要内容包括：论证工程建设必要性；确定工程任务及具体要求；查明选定方案各建筑物区的工程地质条件；选定水库正常蓄水位及其他特征水位，明确工程运行要求和方式；选定电站装机容量，选定机组机型，确定接入电力系统的方式；选定工程建设场址、坝（厂）址等；确定工程总体布置方式、主要建筑物的轴线、线路、结构形式和布置方式和工程量；选定对外交通运输方案，确定导流方式、主体工程施工方法、施工总布置等方案，安排施工总进度；确定建设征地范围，提出建设征地和移民安置规划设计；提出环境保护和水土保持措施设计；编制可行性研究设计概算；进行国民经济评价和财务评价。可行性研究通常要形成正常蓄水位选择、施工总布置规划、建设征地和移民安置规划设计、水土保持、环境影响、劳动安全与工业卫生等专题报告。中国能源行业提出的DL/T 5020—2007《水电工程可行性研究报告编制规程》规定了可行性研究的原则、内容、工作深度和技术要求，以及可行性研究报告及有关专题研究报告的编写要求。

现场施工前期准备。为了缩短水电工程建设工期，促进水电效益尽早发挥，经过相关部门审批后，水电工程可以开展必要的“三通一平”等施工前期准备工程，主要有对外交通、施工供电、施工通信、施工期征地移民等筹建工作，场内交通、场地平整、施工工程、生活和生产房屋等工程建设。

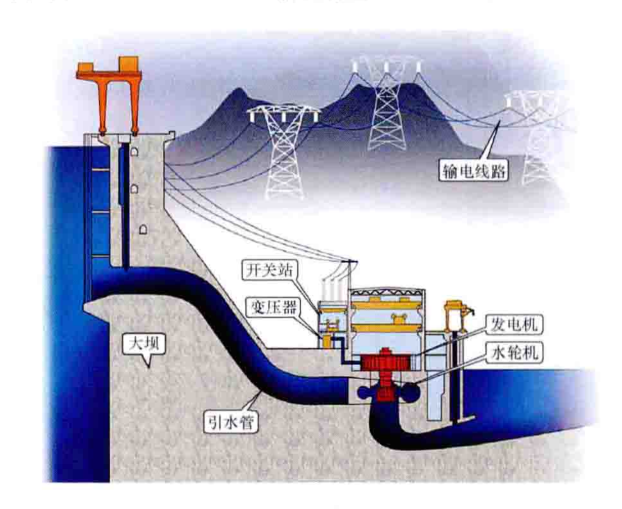
shuidianzhan

水电站 (hydropower station) 将水能转换成电能的工厂。又称水力发电厂或水力发电站。抽水蓄能电站发电工况也是把水能转换成电能，所以也属于水电站范畴。

与火电厂比较，建造在河川上的常规水电站每千瓦装机容量的造价虽较高，但系利用水能发电，不需燃料，运行管理费用又低，因而每千瓦时的发电成本一般比其他电源的发电成本低。常规水电站除向电力系统提供电力、电量外，由于其水轮发电机组起停方便、迅速，只要具有能对径流进行日调节以上的水库，往往是优越的调峰、调频和事故备用电源。在电力系统规模和负荷峰谷差日渐增大的情况下，常规水电站在系统中承担调峰、调频、事故备用的作用和对系统安全与经济方面的效益也越显著。此外，水电站还具有节约燃料和不污染空气的优点；常规水电站的水库一般还具有综合利用效益（见水力发电）。因此，在工业发达国家的电力工业发展过程中，一般首先着力建设水电站。20世纪50年代，不少欧洲国家的电力系统中，由水电站提供的电量比重超过50%，甚至超过90%。这些国家在水能资源大部分被开发以后，这一比重才逐渐下降。据联合国《世界能源统计年鉴》，2010年世界水电多年平均年发电量为34277亿kW·h，占总多年平均年发电量的16.1%，水电装机容量占总装机容量的20.5%。中国2010年电力总装机容量9亿kW，其中水电装机容量为199115MW，占22.1%；总多年平均年发电量42065亿kW·h，其中水电多年平均年发电量为6863亿kW·h，占16.3%。

类型 按利用能源的种类，水电站可分为常规水电站、抽水蓄能电站、潮汐电站和波浪能电站等。

常规水电站 将河川（包括湖泊、地下水）中的水能转换成电能，是技术最成熟、开发最多的一种水电站，其发电原理见图。国际上已建成的装机规模最大的常规水电站为中国的长江三峡水利枢纽，装机容量22500MW。



常规水电站发电原理图

抽水蓄能电站 利用电力系统内在负荷低谷时的多余电量将低处水库（称下水库）内的水抽蓄到高处水库（称上水库）内，在负荷高峰时从上水库引水发电将水排入下水库的水电站。中国的广州抽水蓄能电站、惠州抽水蓄能电站，装机容量均为2400MW，分别于1999年、2012年建成，为世界上装机容量最大的抽水蓄能电站。

潮汐电站 将潮汐能转换成电能的水电站。一般在海湾或河口修筑堤坝形成水库，于涨潮时放海水入库，利用库水位低于潮位的水位差发电；待潮位下降，又利用库水位高于潮位的水位差和库内蓄存的水量发电。法国朗斯潮汐电站装机容量240MW，1961年初开始破土动工，1966年第一台机组发电，1967年底，24台机组全部投入使用，是20世纪世界上最大的潮汐电站。始华（SIHWA）湖潮汐电站是韩国第一座潮汐电站，装机容量260MW，工程于2003年开工建设，2011年投入运行，是世界上最大的潮汐电站。中国最大的潮汐电站江厦潮汐电站设计装机容量3900kW，共安装6台机组，前5台机组于1980～1985年间投入运行，装机容量3200kW；第6台机组于2007年投入运行，装机容量700kW。电站年发电量720万kW·h。

波浪能电站 将海洋的波浪能转换成电能的水电站。此

种水电站尚处于试验阶段，还未建成有一定工业规模的电站。

常规水电站还可按水头集中方式、水库调节性能和装机规模的区别进行分类。

按水头集中的方式可分为坝式水电站、引水式水电站和混合式水电站。

按水库调节径流的能力可分为多年调节水电站、年调节水电站、季调节水电站、周调节水电站、日调节水电站（见径流调节）和不调节径流的径流式水电站等。

按单站装机容量的规模分类，世界各国尚没有统一的划分标准。中国现行的划分标准为：单站装机容量300MW及以上为大型，其中大于1200MW的为大（1）型，1200～300MW为大（2）型；300MW以下至50MW为中型；小于50MW为小型，其中50～10MW为小（1）型，小于10MW为小（2）型。

组成 水电站主要由挡水建筑物、泄水建筑物、排沙设施、发电引水系统、发电系统，以及其他引水设施和过坝设施等组成。

挡水建筑物 拦河修建的坝、闸或河床式水电站的厂房。挡水建筑物的作用为壅高上游水位，集中水头用以发电并形成水库以调节径流。拦河坝一般分为土石坝和混凝土坝两大类型，据坝址的地形地质条件及建坝材料的来源等因素，经技术经济比较后选用。当壅水不高而需较大的泄洪流量时，可用闸挡水。闸由闸墩和闸门组成，既是挡水建筑物，又是泄水建筑物。当壅水不高而河床比较开阔时，也可把水电站厂房作为挡水建筑物的组成部分，称为河床式水电站。

泄水建筑物 其主要作用为泄放洪水出库以保证坝的安全和控制出库下泄流量以满足下游的防洪要求。泄水建筑物有时还可用以泄放下游灌溉、工业、生活和生态等要求的用水，或用以放低水库水位，或兼作为排沙、施工导流的设施。泄水建筑物有溢洪道、泄洪隧洞、泄水闸和坝身泄水孔等类型，根据泄放水要求结合坝型和地形条件进行选择。

排沙设施 其主要作用有：①排沙出库以保持水库的调节库容。②排泄厂房或坝上游附近的淤沙以减少泥沙进入水轮机或泄水孔，减轻泥沙磨损。排沙设施有排沙孔和冲沙闸等类型，根据排沙要求结合枢纽布置进行选择。

发电引水系统 将发电用水从电站上游河道或水库引入厂房，经过水轮机，用以发电后再从厂房排入下游河道或下级水库。坝式水电站的发电引水系统比较简单，仅由进水口、压力管道、尾水管和相应的闸、阀与启闭设备组成；引水式水电站和混合式水电站的发电引水系统比较复杂，包括有进水口、引水隧洞（或引水明管、引水明渠）、调压室（或井）或压力前池、压力管道、尾水管或尾水隧洞（或尾水明渠）等建筑物以及相应的闸、阀和启闭设备等。

发电系统 水电站的核心，包括主厂房、副厂房、变电站、开关站、中央控制室；安装有发电设备、生产辅助设备、变电设备、高压电器设备、控制保护设备和厂用电设备等。

水轮发电机组是发电的主要设备，由水轮机和水轮发电机组成。利用水流的压力或流速水头推动水轮机，水轮机再带动水轮发电机发电。水轮发电机组的主要附属设备有进口阀、水轮机调速器、油压装置、水轮发电机励磁、冷却系统（见水轮发电机空气冷却、水轮发电机水内冷和水轮发电机蒸发冷却）和起重设备。所有这些设备都安装在水电站厂房内。

主变压器把水轮发电机电压升高到高压或超高压，以便远距离输电。设置变压器的变电站位置一般靠近主厂房，结合考虑水电站的开发方式和地形地质条件选定。

高压电器设备包括断路器、隔离开关、电流互感器、电压互感器、避雷器、阻波器和母线等。这些设备一般都布置在开关站内。开关站一般布置在离厂房不远的地方。

其他引水设施 为满足灌溉、工业或生活用水需要而设置的从水库引水的设施。一般在水库岸边或通过坝体修建取水口引水。在取水口下游一般要考虑设置消能设施，使水流能平稳地沿输水渠道或管道流送到需水地点。

过坝设施 为船舶、木、竹、鱼类过坝而设置的设施。过船设施有船闸或升船机；过木、竹设施有过木、竹机或筏道；过鱼设施有鱼梯、鱼道或集鱼船等。

在电力系统中的作用 水电站向所在电力系统提供电力和电量。不具有调节水库的径流式水电站，往往在电力系统中担负基荷任务；具有调节水库的常规水电站，一般在系统中承担调峰、调频和备用任务。在水能资源丰富、开发条件优良、水电站装机容量比重大的国家（如加拿大、巴西、挪威）的水电站，是电力系统中的主力电源，对满足电力系统电力和电量的需求均起十分重要的作用。在工业发达、系统规模大、火电厂装机容量比重大的国家或系统内的具有调节水库的水电站，除提供电量外主要提供调峰、调频和备用容量。在后一种系统内，可开发利用的水能资源大部分被开发以后，水电站装机容量所占比重将逐渐下降，调峰、调频和备用容量不足的问题逐渐突出，于是对已建的具有调节水库的水电站，在条件许可的情况下多先后采取扩大装机容量的工程措施，或另修建抽水蓄能电站，以解决调峰、调频和备用容量不足的问题。如美国于1941年已建成大古力水电站，原装机容量1974MW，80年代扩建后增大到6494MW，计划还将扩大到10 830MW；不少国家已修建了许多抽水蓄能电站。中国的华北、华东、华南、东北地区，电力系统规模大，区内水能资源的开发利用率较高，都已着手考虑扩建某些已建水电站和修建抽水蓄能电站，如丰满水电站装机容量已由554MW扩大到1004MW，并规划再扩大到1480MW，广东省的广州抽水蓄能电站、北京的十三陵抽水蓄能电站和浙江省的天荒坪抽水蓄能电站等均已相继建成。

shuidianzhan caiwu pingjia

水电站财务评价

(financial evaluation of hydropower station) 根据国家现行财税制度和价格体系，分析计算水电站建设项目直接发生的财务效益和费用，编制财务报表，计算财务评价指标，考察和分析项目的盈利能力、偿债能力、市场竞争力及财务生存能力，以判别项目的财务可行性。又称财务分析。财务评价是从财务主体和投资方的角度考察其财务上的可行性，对于国民经济评价结论好，但财务评价不可行的项目，应重新考虑方案，必要时可向国家提出有关优惠措施的建议，使项目具有财务生存能力。

财务评价方法 财务评价可分为融资前分析和融资后分析。一般宜先进行融资前分析，在融资前分析满足要求的情况下，按着设定或初步设定的融资方案，再进行融资后分析。

融资前分析 融资前分析应以动态分析为主，静态分析为辅。融资前动态分析应以营业收入、建设投资、经营成本

和流动资金的估算为基础，考察整个计算期内现金流入和现金流出，编制项目投资现金流量表，计算项目投资内部收益率和净现值等指标。融资前分析排除了融资方案变化的影响，从项目投资总获利能力的角度考察项目方案设计的合理性。融资前分析的相关指标应作为初步投资决策和融资方案研究的依据和基础。

融资后分析　以融资前分析和初步的融资方案为基础，考察项目在拟定融资条件下的盈利能力、偿债能力和财务生存能力，判断项目方案在融资条件下的可行性。融资后分析还用于比选融资方案，帮助投资者作出融资决策。

财务评价内容　包括建设资金筹措、效益计算、费用计算、盈利能力分析、偿债能力分析、不确定性分析及财务可行性分析等，通过计算报表来计算和表示。

建设资金筹措　水电工程项目资金来源有银行贷款、地方集资、发行电力建设债券、业主自有资金以及国外贷款等。中国规定项目业主利用自有资金所出项目的资本金应占总投资的20%以上。

效益计算　按产出物的价格计算产品的销售（营业）收入即为项目的财务效益。对于水电建设项目来说，其直接发生的财务效益主要为发电效益，对于具有综合利用任务的项目，还应计算相应的综合财务效益。水电站的发电效益包括电量效益和容量效益（见水电站效益），是按电站上网电量和上网电价进行计算，没有将容量价格从上网电价中分离出来，电量价格和容量价格的两部制电价体系还没有完全建立。

费用计算　按投入物的价格计算项目的各项财务支出，包括项目总投资（含固定资产投资、建设期借款利息和流动资金）、经营成本和税金。根据水电建设项目的特点，水电站的发电总成本费用包括产品成本和财务费用。产品成本包括经营成本、折旧费、摊销费，其中经营成本包括修理费、工资福利及劳保统筹费和住房基金、保险费、材料费、其他费用、抽水电费（抽水蓄能电站）、库区维护费和库区移民后期扶持基金等；财务费用主要为利息支出（见水电站发电成本）。水电的税金主要为增值税、销售税金附加和所得税等。

盈利能力分析　主要考察投资的盈利水平，计算指标包括项目投资财务内部收益率（*FIRR*）和财务净现值（*FNPV*），项目资本金财务内部收益率、投资回收期（P_t），总投资收益率和项目资本金净利润率等。（见盈利能力）

偿债能力分析　主要考察计算期内各年的偿债能力。计算指标有利息备付率、偿债备付率和资产负债率等。（见偿债能力）

不确定性分析　主要包括敏感性分析和盈亏平衡分析，一般不作概率分析。敏感性分析主要是测算财务敏感性因素的变化对财务内部收益率的影响。敏感性因素主要有固定资产投资、建设期、发电量、容量效益、借款利率等，计算方法同国民经济评价。盈亏平衡分析是通过盈亏平衡点分析项目成本与收益的平衡关系，盈亏平衡点越低，表明项目适应市场变化的能力越大，抗风险能力越强。盈亏平衡分析只在必要时再进行。

财务可行性分析　针对各种财务评价指标，分析项目的财务可行性，必要时提出财务可行的途径。如果在项目财务评价中是按照满足一定的目标收益率来测算与反推上网电价，则要对测算的上网电价的市场竞争力进行分析，重点分析论证采用的电价在市场中是否可接受。财务可行性分析还包括财务生存能力分析，主要是分析项目是否有足够的净现金流量维持正常运营，以实现财务的可持续性。

水电建设项目财务评价报表　根据水电建设项目的特点，在财务评价时主要需要编制的报表有建设投资概（估）算表、项目总投资使用计划和资金筹措表、总成本费用估算表、项目财务现金流量表、项目资本金财务现金流量表、投资各方现金流量表、利润与利润分配表、财务计划现金流量表、资产负债表等。

shuidianzhan changfang

水电站厂房

（hydropower house）　安装水轮发电机组及其附属机电设备和辅助生产设施的建筑物。通常由主厂房和副厂房组成，但小型水电站也有不设副厂房的。主厂房又分主机间和安装间。主机间装置水轮机、发电机及附属设备；安装间是机组安装和检修时，摆放、组装和修理主要部件的场地。副厂房包括专门布置各种电气控制设备、配电装置、电厂公用设施的车间以及生产管理工作间。主厂房、副厂房连同附近的其他构筑物及设施，统称厂区。

类型　按厂房布置特点分为地面式厂房和地下式厂房。地面式厂房按位置的不同又可分为河床式厂房、坝后式厂房、岸边式厂房、坝内式厂房和溢流式厂房。河床式厂房位于河道上兼有壅水作用。坝后式厂房位于拦河坝下游坝趾附近。岸边式厂房位于拦河坝下游河岸边。坝内式厂房位于坝体空腔内。溢流式厂房位于溢流坝坝趾，坝上泄水水流流经或跃过厂房顶部进入下游。地下式厂房位于地下洞室中。厂房内安装的水轮发电机组的型式，按水电站的水头、流量大小等因素确定。水电站厂房类型如图1所示。

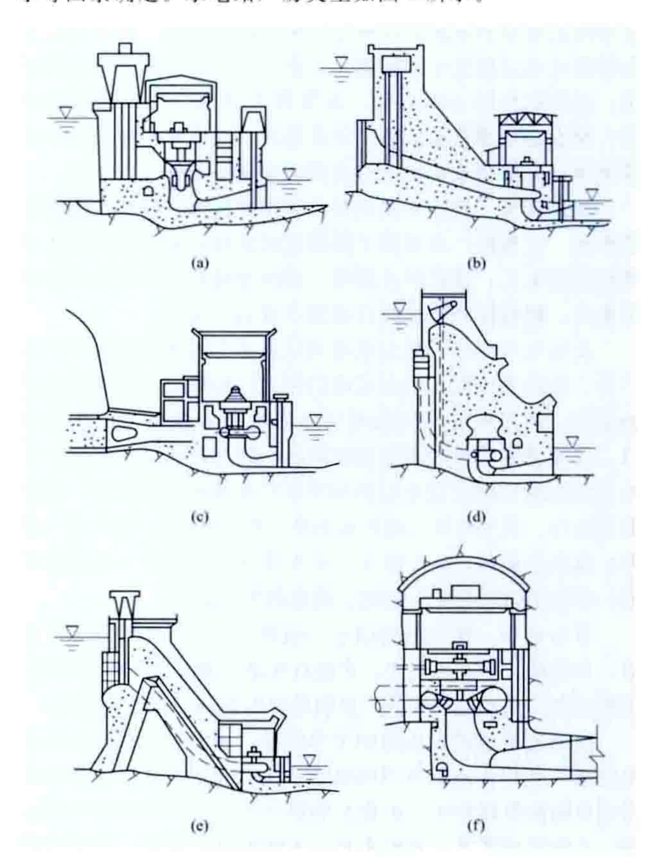


图1　水电站厂房类型示意图

(a) 河床式；(b) 坝后式；(c) 岸边式；(d) 坝内式；(e) 溢流式；(f) 地下式

厂房布置 常见的水电站厂房布置形式有：①装置立轴混流式（或轴流式）水轮机的岸边式或坝后式厂房（见图2），水流由压力钢管引进厂房，经水轮机的蜗壳，推动转轮后由尾水管泄入尾水渠。蜗壳上游压力钢管上设有供机组发生事故时快速截断水流用的蝴蝶阀或球阀。若压力钢管不长且为单机单管，可仅在进水口、压力前池或调压室建筑物等上装设可快速关闭的闸门。尾水管出口设有尾水闸门及启闭机械，用于机组检修时截断下游水流。②装置立轴轴流式水轮机的河床式厂房（见图3），过流部分由进水口、蜗壳及尾水管所组成，其他布置类似立轴混流式水轮机的厂房。③装置灯泡贯流式水轮机的河床式厂房（见图4），水轮机为贯流式，发电机装设在灯泡形的金属壳体内，通过主轴与水轮机连接，整个机组安装在一个卧式管状结构物中。机组检修时，可将灯泡体拆开，对水轮机和发电机分别进行检修。④装置立轴或横轴冲击式水轮机的地下式或地面式厂房（见图5），水流由压力钢管引进厂房，经针阀调控，由喷嘴射出冲动水斗，使机组转动发电，水束离开水斗后自由落入尾水槽，然后泄入尾水洞。针阀前的球阀安装在主厂房内或主厂房外的阀室内，水轮机叶轮一般安装在最高尾水位以上，保证转动时不受尾水槽中水面阻碍。主机间上层设有桥式起重机，供机组安装及检修使用。⑤装置水泵水轮机组的抽水蓄能电站厂房（见图6），发电时水流由上水库经压力管道引进厂房，使机组转动发电，水流经尾水管进入下水库；抽水时水流由下水库经尾水管、水泵水轮机和压力管道泵入上水库蓄能。水泵水轮机组安装高程低，一般采用地下式厂房。

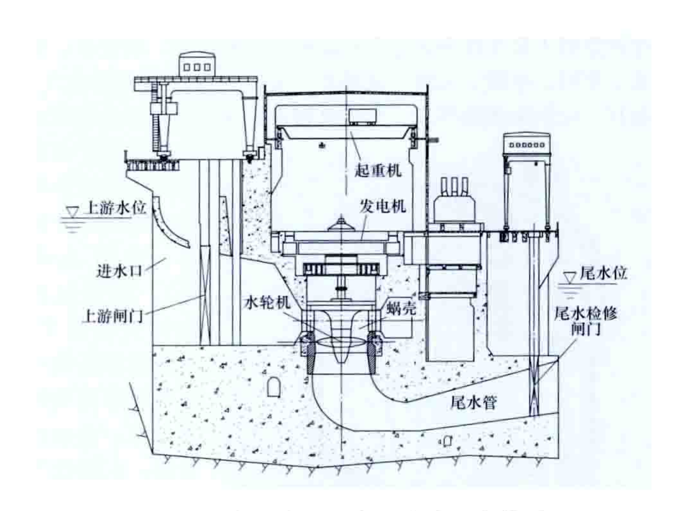


图3 立轴轴流式水轮机河床式厂房横剖面

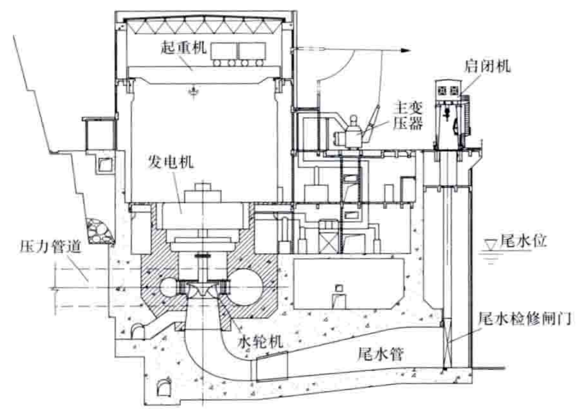


图2 立轴混流式水轮机岸边式（或坝后式）厂房横剖面

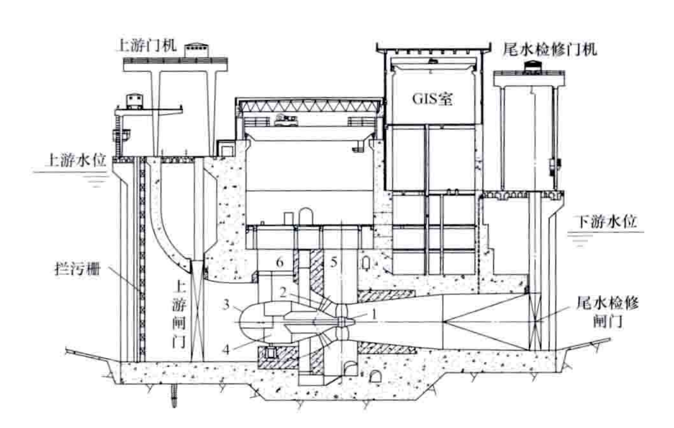


图4 灯泡贯流式水轮机河床式厂房横剖面

1—转轮；2—导叶；3—灯泡外壳；4—发电机；5—水轮机吊物孔；6—发电机吊物孔

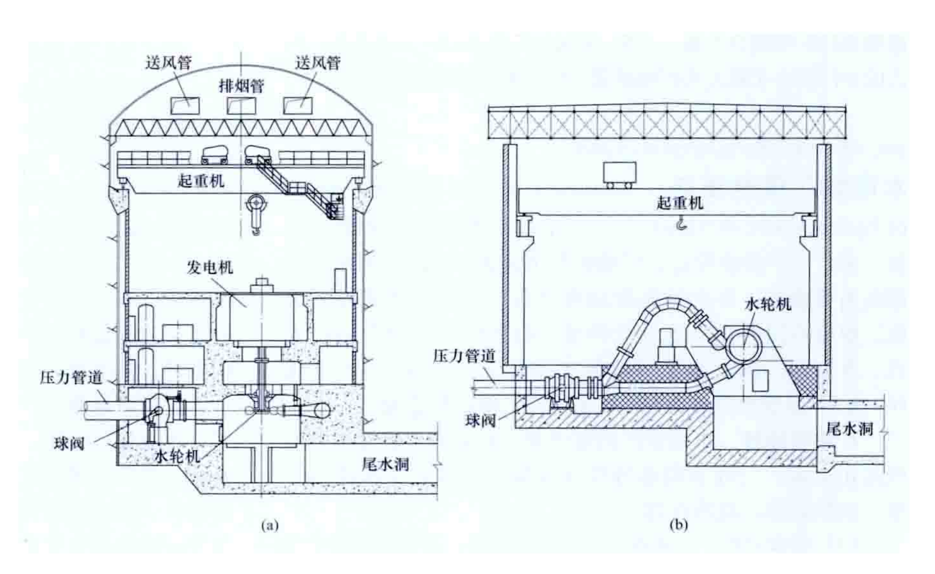


图5 冲击式水轮机厂房横剖面

(a) 立轴式机组地下厂房；(b) 横轴式机组地面厂房

厂房设计 水电站厂房依据水电站开发方式，厂址的地形、地质、水文、水能等条件，经过技术经济比较后综合选择和合理布置。大中型水电站一般需满足的要求有：①输水系统水流顺畅，能量损失小。②厂房各部分空间尺寸应满足机组及其他机电设备的安全运行，以及检修和安装需要。③建筑物及机电设备的防水淹、抗震、防泥沙淤堵、防磨蚀、防火、防雷、防爆、防冻、通风、防潮、防酸、防尘、防虫等要根据水电站具体情况采取相应措施，保证厂房正常运行和安全。④提供运行、检修、

生产管理人员工作和休息所必需的场所和设施，如卫生、采光、照明、空调、采暖、电梯等。⑤厂内外交通满足施工、运行、检修和消防要求。⑥建筑物在使用期内具备足够的耐久性和安全可靠性，遇特殊情况（如遭受特大洪水、强烈地震等），应避免次生灾害的发生，受到损坏后经过短期修理即可恢复发电。⑦布置合理，工程投资省。⑧水电站所在地常常是参观旅游场所，厂房的建筑造型、装修和环境应能给人们美的感受。

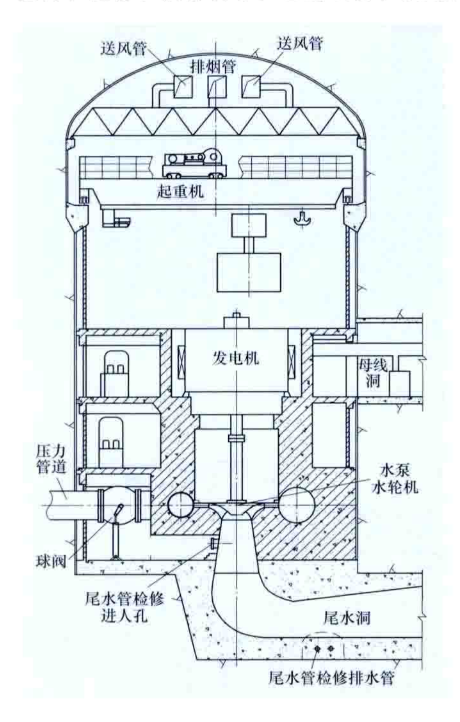


图6　抽水蓄能电站地下厂房横剖面

厂区　包括主厂房、副厂房、主变压器场、开关站、连接厂房的引水道、尾水道、进厂交通及厂前区等所构成的区域。要协调厂区各建筑物之间的相互关系，以方便管理和安全运行，并符合经济原则。地面厂房常将主变压器场布置在厂坝间、厂房尾水平台、厂房端部等场地，地下式厂房主变压器一般布置在地下。户外式高压配电装置占用的空间较大，大型电站已越来越多地采用由气体绝缘金属封闭组合电器（GIS）组成的户内式GIS开关布置，所占的空间远小于敞开式配电装置，使开关站布置更加紧凑。

shuidianzhan changyongdian xitong

水电站厂用电系统

（station service power system of hydropower station）　为了向水电站机组的附属设备、全厂生产辅助设备、厂坝区公用设施以及暖通和照明等用电负荷供电，将电源连接到用电负荷的电器和装置的总称。根据不同的厂用电负荷要求，有不同的厂用电接线方式。水电站厂用电系统一般采用高压（10、6kV）和低压（0.4kV）两级电压或低压（0.4kV）一级电压供电。

厂用电接线　水电站厂用电电源、设备和负荷之间的电气连接关系，一般采用单母线分段接线形式，要求供电可靠、接线简单、经济合理。

（1）供电可靠。主要有3个方面的要求：①选用质量合格的厂用电设备；②设备上下各级之间保护动作选择性配合合理，故障时不发生越级跳闸；③保证重要的厂用电负荷供电电源可靠。

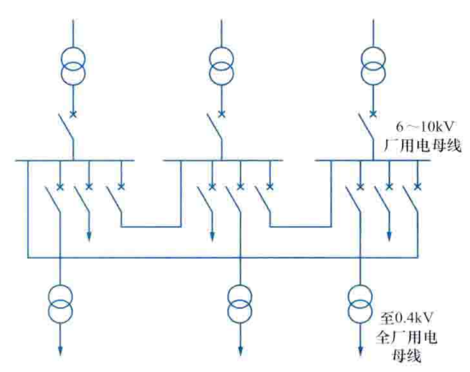
（2）接线简单。电源、设备和负荷之间的连接清晰明了，尽量简化接线，减小因设备间连接复杂互相影响而增加的故障概率，也便于操作维护和管理，减少误操作事故，从而提高厂用电系统的运行可靠性。

（3）经济合理。在技术优越性基本相同的基础上，力求造价最省。

高压厂用电接线　有两种基本接线方式：一种是单母线分段，每段母线上一般有两个电源供电，可互相切换、互为备用；另一种是单母线多分段或单母线多分段环形接线，每一分段母线上接一个电源，通过分段联络断路器实现互为备用，如下图所示。

低压厂用电接线　一般均采用单母线分段接线，分段母线之间通过分段空气断路器实现互为备用。根据负荷使用性质及供电对象的不同，低压厂用电接线可分为机组自用电接线、全厂公用电接线等。

（1）机组自用电接线。接线方式有两种基本形式：①当机组台数多，单机容量大，单机自用电负荷也大时，一般采用由机组自用电变压器的接线。其一，由每台发电机端出线接一台单机自用电变压器，作为本机组自用电负荷的供电电源，并由全厂公用电母线至少引接一回电源作为第二供电电源。这种接线方式供电可靠性较高，但对调峰频繁的水电站适应性较差。其二，对具有两级厂用电电压的大型水电站，采用接至高压厂用母线的单机自用电变压器供电，它较适合于大型调峰电站。②机组自用电由全厂公用电的两段低压母线上各引接一回电源接入机组自用电配电屏，并行供电。



厂用电电源6～10kV主配电屏单母线多分段环形接线简图

（2）全厂公用电接线。对有高、低两级电压的厂用电接线，一般根据电站具体布置情况，将厂用电系统分为高压厂用电源配电屏和低压厂用主配电屏或设几组低压厂用主配电屏。通常，低压厂用主配电屏下接若干分配电屏，以双层辐射式向周围较近负荷供电；靠近主配电屏或容量较大或可靠性要求较高的负荷一般从主配电屏直接引出，以单层辐射式供电。当厂用电接线只有0.4kV一级电压时，大部分厂用电负荷以低压厂用主、分配电屏双层辐射式供电。对机组台数较少且容量较小的水电站，则以单层辐射式供电，即从主配电屏直接引出回路供给负荷。

厂用电电源　厂用电电源应满足电站各种不同运行工况下，在数量、电压、容量等方面确保厂用电负荷供电可靠的要求。高压厂用电电源一般通过几种方式取得，例如由发电机出口、地区配电网（或保留的施工变电站）、开关站高压母线、梯级水电站或水电站群6～35kV供电联络线、小型水轮发电机组、应急保安电源等引接。

（1）厂用电电源的数量。通常根据电站规模及运行方式确定。对中型水电站，要有两个及以上的独立电源；对调峰电站，其中一个应是外来电源或能自动切换为由外来电源供电；在全厂停机时，可允许仅有一个厂用电电源运行。大型水电站要有3个及以上的独立电源，其中至少有一个是外来电源；在任何运行方式下，应保持两个厂用电电源运行。外

来电源的作用是在全厂停机时，保证对重要的厂用电负荷供电。几个独立电源可以同时投入供电，互为备用，也可采用工作电源运行，备用电源不投入运行，当工作电源故障时，备用电源自动投入运行的工作方式。

（2）厂用电电源的电压。当厂用电设备负荷相对较集中，全厂厂用电负荷不大，且无高压电动机负荷时，如中型水电站，一般采用低压 0.4kV 一级电压供电，可减少变压器重复容量、损耗以及厂用配电装置的数量，有利于厂房布置。当水电站枢纽范围较大，厂用电负荷较大或有高压电动机负荷时，一般采用两级电压供电，高一级电源电压一般采用 10kV（或 6kV）。除高压电动机外，其他厂用电负荷则在各负荷点设 10kV（或 6kV）/0.4kV 厂用配电变压器，以 0.4kV 电压供电。

（3）厂用电电源的容量。一般根据厂用电负荷的特性确定。厂用变压器容量通常要满足其中一台变压器停止运行，其余变压器仍能供给全厂正常运行所需的厂用电最大负荷，并计及厂用电负荷的同时率、负荷率以及网损率；同时，还要满足一台机组检修、其余机组全部运行时的厂用电最大负荷；此外，还需满足全厂需要自起动的电动机在故障消除后能自起动并恢复电站可正常发电的要求。

厂用电设备 从厂用变压器到水电站辅助生产设备的各种类型电器，主要包括厂用变压器、高压开关柜、低压配电屏、各类电机、母线及电缆等。水电站厂用变压器，户内一般采用干式变压器，户外多采用油浸式变压器。对于与离相封闭母线直接连接的厂用变压器，一般采用单相干式变压器。开关电器采用成套式高压开关柜和低压配电屏。

厂用电负荷 按重要性程度分为Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ三类：

（1）Ⅰ类负荷。停止此类负荷供电，将使设备不能正常运行或停止运行，甚至使设备受到损坏。这类负荷只允许瞬时中断电源，应保证其供电的可靠性，要求有两个电源供电，互为备用，自动切换。

（2）Ⅱ类负荷。短时停止此类负荷供电，不会影响水电站正常运行或造成设备损坏。这类负荷允许电源中断数十分钟，允许通过人工操作切换恢复供电，应尽量保证其供电的可靠性，一般亦要求有两个电源，互为备用，可手动切换。

（3）Ⅲ类负荷。允许较长时间停止供电，不会影响水电站正常运行，一般采用单电源以干线式供电。

水电站在正常情况下，有 30%～50% 的厂用电负荷经常运行，大部分负荷是间歇性的。常规水电站的厂用电负荷一般仅占电站装机容量的 0.4%～1.5%。抽水蓄能机组抽水工况变频起动负荷为机组单机容量的 6%～8%。因此，抽水蓄能电站的厂用电负荷比常规水电站大，可达电站装机容量的 2%～2.5%。

shuidianzhan chuli

水电站出力

（output of hydropower station） 水电站单位时间内输出的能量。又称水电站输出功率。水电站的出力可表示为

$$P = \eta\rho g Q H$$

式中 P 为水力发电的功率，W；η 为引水系统、水轮机和发电机的总效率（$\eta<1.0$，对大中型水电站，一般取 0.87 左右）；ρ 为水的密度，kg/m³，淡水密度取 1000kg/m³；g 为重力加速度，取 9.81m/s²；Q 为通过水轮机的流量，m³/s；H 为水头，m。

发电流量取决于入库流量、水库调节性能、水库运行方式和水轮机过水能力。水头取决于水库水位、尾水位和水头损失。水库水位在水库运行过程中随时间而变化。尾水位是发电流量和弃水流量的函数。为了使水电站的出力在一年中各月的平均值保持稳定且达到可能最大值，必须根据径流和水库特性，研究水库合理的消落水位和运行方式。

水电站的年平均和月平均出力的分布，在不同的电站有很大的差异。季（年）调节的中高水头水电站，丰水年出力大，枯水年出力小；枯水期一般按保证出力发电；丰水期按加大出力发电；特枯年枯水期的某些月份，按降低出力发电，正常运行遭到破坏。年调节水电站，在全年各月的出力则较均匀。多年调节水电站，其各年的出力及年内各月的出力均较均匀。担负梯级或跨流域补偿调节的水电站，其出力往往枯水期大汛期小，甚至枯水年大丰水年小。图 1 所示为季调节中高水头水电站出力过程及出力保证率曲线的特征，每年的枯水期发保证出力，汛期随径流的大小而变化，特枯年的枯水期发降低保证出力，其保证率曲线有一个不大的保证出力“平台”。

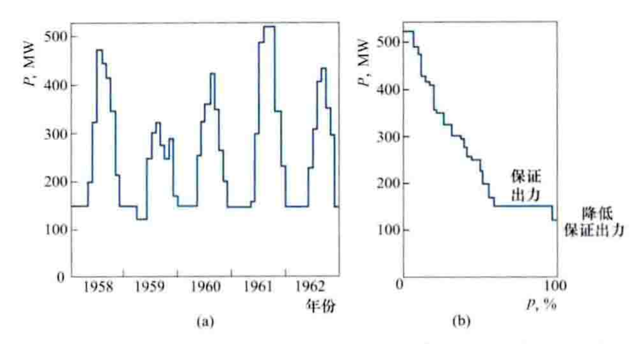


图 1　季调节中高水头水电站出力过程及出力保证率曲线

（a）出力过程；（b）出力保证率曲线

调节性能差的低水头水电站，不但枯水期出力较小，汛期由于大泄流量引起下游水位增高而减小了水头，其预想出力反而小了，也导致出力的减小，其流量、出力过程及出力保证率曲线见图 2。从图 2（a）可以看出，在一年汛期的某些月份，流量很大，但出力反而减小，枯水期出力也较小；从图 2（b）出力保证率曲线上可以看出，其水流出力保证率曲线没有一个明显的“平台”。

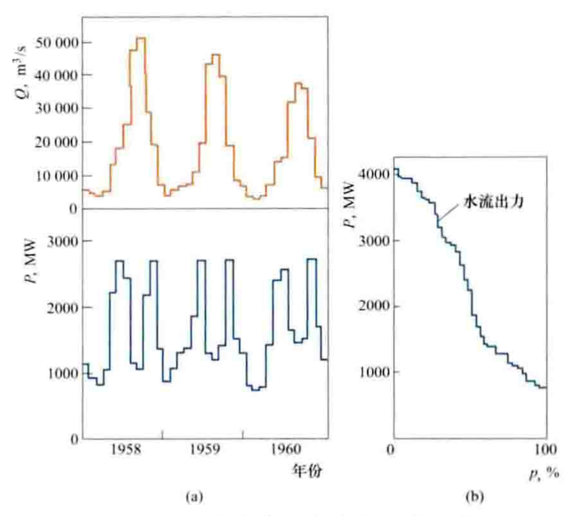


图 2　径流式低水头水电站流量、出力过程及出力保证率曲线

（a）流量、出力过程；（b）出力保证率曲线

水电站的规划设计中，保证出力和预想出力（见水电站额定水头）是重要的指标。前者是水电站能量效益的基础，后者是发挥水电站容量效益的基础。

shuidianzhan de shebei kongzhi

水电站的设备控制 （equipment control of hydropower station） 水电站运行和管理所需要的对站内主要系统及机电设备进行控制（操作、调整）的过程。水电站运行过程中，为实现对机电设备的运行和管理，必要的操作和调整是必不可少的，包括水电站的控制方式选择和切换、机电设备的操作和设备的调整等。

控制方式选择及切换 一般来说，水电站控制方式主要分为调度层（含梯级集控中心）、电站中控层和现地单元层。

调度层、中控层的选择在电站中控层实现，电站中控室设置远方（调度）/现地（电站）控制权选择软开关。当控制方式在中控层时，在中控室控制台上进行操作，电站计算机监控系统不接收调度层的操作指令，只向调度层传送信息。

中控层、现地单元层的选择在现地实现。现地控制单元设有控制方式切换开关，当控制权限设置在现地，由现地控制单元进行控制操作时，中控层上位机有显示，但电站控制命令不起作用。

此外，对于各设备或系统，还设有远方/现地控制方式。远方控制方式下，设备控制权交由电站监控系统，现地方式多用于电站投运初期和调试阶段，设备的操作直接在现地控制柜（箱）上完成，控制权级别最高。

调度层控制（含梯级集控中心） 水电站由调度中心（包括集控中心）监视和控制，主要完成机组工况转换，高压出线设备的分合操作，电站自动发电控制（automatic generation control，AGC）、自动电压控制（automatic voltage control，AVC）运行等。水电站的运行人员只监视设备的运行情况。

电站中控层控制 水电站由电站中控室监控，可实现对电站所有机电设备的监视和控制，调度层只监视电站的运行。

现地单元层控制 通过电站监控系统现地控制单元，完成本单元监控对象的监视和操作。包括机组工况转换，机组程序控制，紧急停机，单机负荷调整，断路器同步并网，断路器和隔离开关远方分、合，厂用电电源切换，紧急落门等。

设备的操作 主要有：

（1）电站自动发电控制（AGC）、自动电压控制（AVC）的投退。

（2）机组工况转换控制。可完成机组各种运行工况的转换，工况转换可以全自动进行，也可以分步自动进行。在进行机组工况转换时，操作人员只需选择机组的目标工况，即从现有的工况拟转换至何种工况，然后发出执行令；特殊情况下，对于抽水蓄能机组水泵起动，还要事先选定采用变频起动还是背靠背起动。

（3）断路器、隔离开关和接地开关的分、合操作。需严格执行“五防”（防止带负荷拉合隔离开关、防止误拉合断路器、防止带电挂地线、防止带地线合闸及防止误入有电间隔）的规定。断路器可以实现手动和电动操作分、合控制，跳、合闸回路中设置监视继电器，同时设置电气防跳跃闭锁回路。对于分相控制的断路器，跳、合闸回路监视继电器和防跳跃闭锁装置需按相分别装设。

（4）厂用电的切换。电站一般设置两路以上的厂用电源，当其中一路电源消失时，通过对厂用电配电系统各断路器及带远方操作机构的自动开关的操作，完成备用电源的切换。

（5）报警复归。当电站设备发生事故或事件后，在人机界面上自动指出事故或事件并发出报警信号，当运行人员已了解事故或事件的情况后，可对报警信号远方手动复归。

（6）越限报警点投入和退出控制。设定或调整越限报警点是否参与或部分参与安全运行监视。

（7）事故闸门控制。运行人员能在中控室发出事故闸门操作的控制命令，实现远方紧急落事故门，应有防误操作措施。

（8）机组黑起动。在全厂发电机停机且失去正常厂用电源的情况下，利用柴油发电机或电站直流系统，通过规定的程序起动机组发电投入运行，投入厂用电。

（9）辅机设备和公用设备的起停控制。对于电站机组的辅助设备和厂内公用设备，一般均设置现地控制箱，实现设备的现地起停控制，如冷却水泵的起停、渗漏及检修排水泵的起停、中低压空压气机的起停、通风机的起停等。

设备的调整 包括电站和机组的频率和有功功率、电压和无功功率的调整（见水电站自动发电控制、水电站自动电压控制），以及变压器有载调压分接头位置的调整。可以选择自动或手动控制模式。

shuidianzhan dianli shebei

水电站电力设备 （electrical equipment of hydropower station） 水电站中发电、输变电和用电过程中完成电磁能的转换、电压转换、电力传输等功能的电器和装置的总称。水电站的电力设备按其作用一般分为发电设备、发电机电压设备、变电设备、高压配电装置、厂用电设备等。

发电设备 主要指水轮发电机，利用水轮机驱动将动能转化为电能，是水电站生产电能的主要设备。

发电机电压设备 从发电机出口到主变压器低压侧的电路中所连接的各种电器，其电压等级通常为3.3～24kV，具有额定电流和短路开断电流大、短时耐受和峰值耐受电流要求高的特点。主要包括发电机断路器、隔离开关、大电流母线，此外还包括电流互感器、电压互感器、避雷器、发电机中性点接地用的消弧线圈（接地变压器或电阻）、发电机停机用的电气制动装置等。

发电机断路器 用于发电机和变压器之间，正常情况下能合分工作电流、短路时又能快速切断故障电流的可操作电器。一般需在发电机主出线的出口处装设发电机断路器。

发电机断路器的型式按其灭弧介质分类，主要有少油断路器、六氟化硫（SF_6）断路器和真空断路器3种。少油断路器已淘汰。水电站应用的六氟化硫断路器的额定电压、额定电流、短路电流最高分别达24kV、24000A、160kA，真空断路器最高分别可达18kV、10000A、80kA。

为满足水电站调峰运行的需要，机组起停频繁，要求发

电机断路器有较长的机械和电气寿命。此外，发电机电压回路中，短路电流的非周期分量较大，一般为周期分量峰值的0.8～1.0倍。

隔离开关　用于合分无载电路的可操作电器，起电路间隔离的作用。常用的合分结构形式有两种：一种是动静触头为刀闸垂直式结构；另一种是动静触头为水平插入式结构，用于与大电流离相或共箱封闭母线连接。

大电流母线　当发电机额定电流在5000A及以下时，通常采用共箱封闭母线；当额定电流在6300A及以上时，通常采用离相封闭母线，将发电机三相引出的导电母线分相封闭在3个单相铝壳内。按其外壳电气连接方式，一般分为分段绝缘式和全连式2种。

（1）分段绝缘式离相封闭母线。母线外壳只有涡流屏蔽而无环流屏蔽，其壳外磁场强度降低有限，且外壳上的短路电动力较大，中国早期在刘家峡水电站使用过，已很少采用。

（2）全连式离相封闭母线。每相外壳全连成一个整体，用短路板在两端将三相外壳互连接地，使三相外壳在电气上成为一个闭合回路。运行时外壳上产生一个与母线电流方向相反、数值近似相等的感应电流。由于外壳电流对母线磁场的屏蔽作用，使其周围钢构几乎不存在热损耗，短路时母线相间电动力也大大削弱。

大电流离相封闭母线的冷却方式，根据额定电流大小和计算要求，可采用自然冷却方式或强迫通风冷却方式。一般在同一尺寸条件下采用强迫通风冷却，可使母线载流量提高0.5～1倍。当采用自然冷却的离相封闭母线时，对严重潮湿或污秽环境中的大电流离相封闭母线，也有向外壳内供给略高于壳外大气压力的干燥清洁空气（气压为1.02～1.03倍大气压力），以形成微正压，或采用空气干燥循环装置等，避免外部潮湿或污秽空气进入封闭母线内，防止绝缘子结露闪络。

变电设备　水电站的变电设备主要是指升压变压器和联络变压器。升压变压器是利用电磁感应原理把发电机电压（大电流）升高到输电电压（小电流）的主要变电设备。联络变压器用于开关站两种升高电压之间的相互连接，使两种升高电压的电力系统之间通过变压器方便地交换功率。

水电站常用的变压器型式有三相、单相、三相组合式和现场组装式。运输条件允许时，一般选用整体三相变压器。水电站往往地处深山峡谷，受公路、铁路运输条件和电站枢纽布置条件的限制，变压器型式可根据电站实际情况选用单相变压器、三相组合变压器或现场组装三相变压器。

变压器容量一般与水轮发电机组的额定容量相匹配；若水轮发电机组设置了最大容量，则应与水轮发电机组的最大容量相匹配。对布置在屋内或地下的变压器，一般采用强迫油循环水冷式。对布置在屋外的变压器，通风条件较好时采用强迫油循环风冷式，通风条件差时则采用强迫油循环水冷式。

中国水电站已投运的升压变压器最高电压为800kV（拉西瓦水电站），三相变压器最大容量为840MV·A（三峡水电站），单相变压器组最大容量为3×260MV·A（小湾水电站），三相组合变压器最大容量为780MV·A（龙滩水电站），现场组装三相变压器最大容量为400MV·A（龙头石水电站）。在建水电站中三相变压器最大容量为890MV·A（向家坝水电站），三相组合变压器最大容量为855MV·A（溪洛渡水电站），现场组装三相变压器最大容量为723MV·A（大岗山水电站）。

高压配电装置　见水电站高压配电装置。

厂用电设备　见水电站厂用电系统。

shuidianzhan dianqi zhujiexian

水电站电气主接线

(single line diagram for hydropower station)　完成水电站汇集和分配电能的一个系统。表明水轮发电机、变压器和断路器等主要设备通过母线和连接线相互连接，以及本电站与电力系统的电气连接关系。

电气主接线的特点　常规水电站电气主接线的主要特点有：①水电站多处深山峡谷，一般距负荷中心较远，电能主要以高电压向系统送电，发电机电压侧很少接有大功率用户，故升压变压器容量系由相连接的发电机容量确定。②除径流式电站外，大中型水电站大都承担电网的调峰、调频和事故备用任务，而特大型水电站还承担部分的基荷和腰荷，必要时还可作进相运行，水电站机组开、停机频繁，最大发电负荷的利用小时数较低。③水电站电气设备布置及进出线走廊受制约因素较多，如地形、地质条件，水工建筑物等，因此，在满足安全、可靠送电的前提下，要尽量简化接线。

抽水蓄能电站电气主接线除与常规水电站类同外，其特点还包括：①抽水蓄能电站多处于负荷中心或靠近负荷中心，出线回路数少，常以1～2回超高压出线接至附近枢纽变电站，故升高电压侧多采用简单、可靠的接线。②发电电动机组额定容量要考虑在发电工况的额定输出或抽水工况的轴输出功率与水泵水轮机的额定输出或最大输入功率相匹配。主变压器的额定容量除与连接机组的发电容量或抽水容量相匹配外，还要考虑电站厂用电最大计算负荷和变频起动装置以及励磁变压器的负荷。③抽水蓄能电站在发电与抽水工况时机组的旋转方向相反，因此在两种工况转换时需要更换相序。一般采用发电机侧换相，发电机电压侧接线较常规水电站的接线要复杂得多；如采用变压器高压侧换相，则高压侧需增加相应的接线。④发电电动机需要配置起动设备，不同起动方式对电气主接线将产生不同的影响。⑤机组起、停操作较常规调峰水电站更加频繁，运行工况复杂多变。常有发电、发电调相、抽水、抽水调相、事故备用、黑起动等工况及工况转换，以致电站潮流变化大，母线电压波动范围大。对于超过机组母线电压的允许波动范围（±5%）的情况，可采用带负载调压变压器或增加发电机调压范围两种方法解决。中国抽水蓄能电站大多采用无载调压变压器方式。

电气主接线的基本原则　可靠性、灵活性和经济性是电气主接线的3个基本原则。可靠性是首要的，其次是灵活性和经济性。

（1）可靠性。电气主接线首先要满足供电连续性和供电电能质量要求。主接线的可靠性是保证电站电力生产和分配的首要指标，是提高可靠性需增加投资和停电损失之间的合理平衡，是各组成元件和连接方式的综合评价。

（2）灵活性。主接线要能方便和灵活地切换机组、变压器或线路，满足系统各种运行方式下的调度要求；能方便地

停运和切换电气设备，设备检修维护不影响电网的运行和对用户的供电；对分期建设的水电站，还要便于从初期接线过渡到最终接线。

（3）经济性。在满足可靠性和灵活性要求的前提下，力求主接线简单、清晰，以节约投资；接线方式要为配电装置布置创造有利条件，以节约用地和减少开挖；合理选择变压器型式及其与机组的组合方式，以适应运输条件和减少电能损耗。

电气主接线的主要范围　水电站电气主接线包括发电机电压侧接线和升高电压侧接线，对抽水蓄能电站还包括抽水工况的起动接线。

发电机电压侧接线方式分为有汇流母线的接线方式和无汇流母线的接线方式。有汇流母线的接线主要有发电机电压单母线接线、发电机电压单母线隔离开关分段接线、发电机电压单母线断路器分段接线等，一般用于小型水电站。无汇流母线的接线方式主要有发电机一变压器组合接线。发电机-变压器组合接线一般用于大中型水电站，常采用单元接线、扩大单元和联合单元接线。

水电站常用的升高电压侧接线主要有单母线接线、双母线接线、桥形接线、角形接线、3/2断路器接线、4/3断路器接线以及变压器一线路组接线等。

抽水蓄能电站还需设抽水工况用的起动接线。常用的起动方式有异步起动、同轴小电机起动、同步（背靠背）起动、变频起动等。（见抽水蓄能机组水泵工况起动方式）

shuidianzhan duanlu dianliu

水电站短路电流

（short circuit current of hydropower station）　水电站电气回路中由于故障或误操作而造成相间或相地间短路时的电流。发生短路时，电力系统的总阻抗减小，因而伴随短路所发生的基本现象是电流剧烈增大，大型水电机组短路电流绝对值最大可达几十万安培。强大的短路电流所产生的热效应和力效应会使电气设备受到严重损坏。系统发生三相短路时，短路点的线电压将瞬间降到零，短路点附近的电压也将明显降低，可能导致电动机停转，以致设备损坏及产品报废等后果，严重时也可能使整个电力系统遭到破坏，引起大面积停电。

短路类型　三相电力系统中短路的基本类型为：①三相短路；②两相短路；③单相接地短路；④两相接地短路。电力系统的运行经验表明，发生各种短路的概率是不同的，其中以有效接地系统的单相接地短路最多。据2008年国家电网公司运行情况统计，500kV线路共发生713次故障，其中92.71%为单相接地故障，其他分别为两相短路、两相接地短路、发展性故障、三相短路和断线及高阻接地。

三相短路时，三相电流和电压同正常情况一样相差120°，是对称短路。其他类型短路则是不对称短路，一般都用对称分量的原理（见《电力系统卷》对称分量法）将不对称短路的不平衡三相系统分解成三相对称系统。

短路电流计算　在水力发电厂的设计和运行过程中，必须有短路电流计算的结果作为依据，用以解决：①电气主接线方案的比较和选择；②电气设备和载流导体的选择；③继电保护的方案选择和整定；④确定限制短路电流的措施；⑤接地装置的设计等。

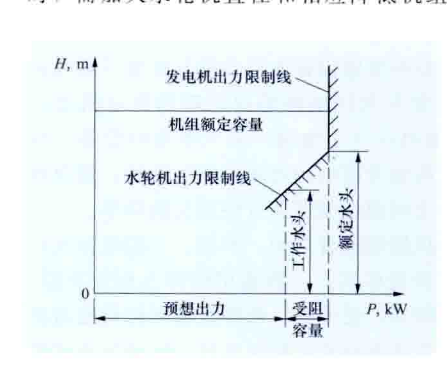
一个电力系统包含许多发电厂、变电站、线路和负荷，而短路过程又是一个比较复杂的过渡过程，不仅有电磁方面的过渡过程，还有机械方面及热方面的过渡过程。所以，要准确地计算短路电流是很复杂的，有时甚至是不可能的，而且在许多情况下这样做也没有必要。因此，通常是在满足工程需要的情况下，采取一些合理的假设，以便略去次要因素，突出主要矛盾，简化短路时的电路和计算分析。（见《电力系统卷》短路电流计算）

shuidianzhan eding shuitou

水电站额定水头

（rated head of hydropower station）
水轮发电机组在额定转速下输出额定功率时的最小水头，在水轮机运转特性曲线上是水轮机出力限制线与发电机出力限制线交点所对应的水头。水电站额定水头是水电站重要的特征水头。水轮机的过水能力与水头的平方根成正比，水头越高，水轮机最大可能的轴出力也越大。水轮机在某一水头条件下所能发出的最大轴出力叫做水轮机水头预想出力，简称预想出力。但水轮发电机组的出力还受发电机容量的限制，因此水轮发电机组的水头预想出力应为水轮机水头预想出力与发电机容量两者中的较小者。当水电站工作水头小于机组额定水头时，机组水头预想出力小于机组额定容量，其不足部分叫做受阻容量。

水轮机额定水头的选择是一个技术经济问题。若额定水头较高，当水电站水库消落深度（即正常蓄水位与死水位的水位差）较大时，或低水头水电站汛期出现大流量，下游水位大幅度抬高时，水头大幅度减小，造成较大的受阻容量。这就须增加电力系统的装机容量，从而付出经济代价。若额定水头较低，则在水轮发电机组额定容量不变时，需加大水轮机直径和相应降低机组转速，使水轮发电机组重量增加，从而增加水电站的建设费用，还可能导致水轮机在高水头时稳定运行区变窄，影响电站的运行灵活性和经济性。水电站某工作水头下，水电站额定水头、预想出力及受阻容量示意图见图。



水电站额定水头、预想出力及受阻容量示意图

参考书目

电力工业部成都勘测设计院．水能设计．北京：电力工业出版社，1981.

shuidianzhan fadian chengben

水电站发电成本

（generating cost of hydropower station）　水电站经营期内为生产电力产品或提供各种电力辅助服务所发生的全部费用。成本费用由经营成本、折旧费、摊销费和财务费用构成。其中经营成本包括修理费、

工资福利及劳保统筹费和住房基金、保险费、材料费、水资源费、库区基金、其他费用、抽水电费（抽水蓄能电站）等；财务费用是指为筹集资金而发生的各项费用，包括生产经营期间发生的利息净支出、汇兑损失、相关的手续费及筹资发生的其他费用。

可按固定成本和可变成本对发电总成本费用进行划分，其中折旧费、摊销费、财务费用、固定修理费、工资福利及劳保统筹费和住房基金、保险费、材料费和其他费用为固定成本，抽水电费、可变修理费、库区持基金为可变成本。

发电成本一般按年计算，称为年发电成本。当按单位电量计算时，称为单位发电成本，是年发电成本与年电量的比值。

shuidianzhan fang'an jingji bijiao

水电站方案经济比较 （economic comparison of hydropower station alternatives） 以经济评价的准则对方案进行比选。方案经济比较是对建设项目优化决策的重要手段，是选择电源开发方案、确定电站规模和工程主要特征值的必要手段，也是项目经济评价工作的重要组成部分。方案经济比较在水电规划设计中应用范围广泛，主要包括：电力系统电源开发方案优化、河流梯级开发方案或抽水蓄能电站选点规划方案比较、电力系统或水电站厂内机组运行优化、水电站工程特征值比较选择等方面。

一般准则 包括：

按国民经济评价结果进行比选 从国家整体角度比较各方案的效益和费用。对于产出物基本相同、投入物构成基本一致的方案进行比选时，为了简化计算，在不会与国民经济评价结果发生矛盾的前提下，也可通过财务评价结果确定，即从企业的角度比较各方案的财务效益和费用。

方案比较 可按各个方案所含的全部因素（相同因素和不同因素），计算各方案的全部经济效益和费用，进行全面的对比；也可就不同因素（不计算相同因素），计算各方案的相对经济效益和费用，进行局部的对比。但要特别注意各个方案间的可比性，遵循效益与费用计算口径对应一致的原则，必要时应考虑相关效益和相关费用。

采用价格 方案比较时，一般可采用财务现行价格，对于在项目费用中占比重较大、国内价格明显不合理的投入物，应采用影子价格。

一般方法 方案比选可采用效益比选法、费用比选法和最低价格法。

效益比选法 包括净现值比较法、净年值比较法、差额投资内部收益率比较法。

（1）净现值比较法。计算各比较方案的财务净现值或经济净现值并进行对比，以净现值大的方案为优。比较净现值时应采用相同的折现率。

（2）净年值比较法。计算各比较方案的净年值并进行对比，以净年值大的方案为优。比较净年值时应采用相同的折现率。

（3）差额投资内部收益率比较法。计算两个方案的差额投资内部收益率（即两个方案各年净现金流量差额的现值之和等于零时的折现率）。当差额投资内部收益率大于或等于社会折现率（采用国民经济评价结果）或财务基准收益率（采用财务评价结果）时，以投资大的方案为优；反之，投资小的方案为优。

费用比选方法 包括费用现值比较法、费用年值比较法。

（1）费用现值比较法。计算各比选方案的总费用现值并进行对比，以费用现值较低的方案为优。

（2）费用年值比较法。计算各比选方案的总费用年值并进行对比，以费用年值较低的方案为优。

最低价格法 分别计算各比较方案净现值等于零时的产品价格并进行比较，以产品价格较低的方案为优。

基本要求 在多方案比选中，应分析不确定性因素和风险因素对方案比选的影响，判断其对比选结果的影响程度，必要时应进行不确定性分析和风险分析，以确定比选结果的有效性。具体要求包括：

（1）方案比选提供的基本资料应可靠、协调、合理。

（2）同时进行经济费用效益分析和财务分析视角下的方案经济比选时，方案经济比选主要按经济费用效益分析的结论选择方案。在选择方案时应立足整体利益，遵循国民经济评价原则。为了简化计算或作为国民经济评价比较指标的有益补充，在不与国民经济评价结果发生矛盾的情况下，也可进一步参考财务指标来选择方案。

（3）当比选方案的经济指标差异不大时，不能简单依此判断优劣，要充分考虑环境、社会和风险等难以定量的因素进行综合分析比较选择。

（4）只有当经济指标的取值存在足够的差异，且估算和测算的误差不足以使评价结论出现逆转时，才能认定比选方案有显著差异，并据此判定方案的经济优劣。

常用方法 根据水电规划设计的实际情况，在进行水电站方案经济比较时，应遵循各比较方案同等满足电力系统要求的准则，当方案效益不同时，应补充方案间相差效益的替代措施，计算相差的费用，进行比较。水电站方案经济比较采用的常用方法主要有差额投资内部收益率法、费用现值比较法、年费用比较法。对于中小型的水电建设项目，在初选方案时，可采用简便方法，如静态差额投资收益率法或静态差额投资回收期法。

能够计算效益的方案经济比较方法 当能够计算两个方案的效益和费用时，可以采用差额投资内部收益率法。当差额投资内部收益率大于或等于综合贷款利率或电力工业基准收益率时，投资大的方案较优；反之，投资小的方案较优。差额投资内部收益率的计算公式为

$$\sum_{t=1}^{n}[(CI-CO)_2-(CI-CO)_1]_t(1+DIRR)^{-t}=0$$

式中 $(CI-CO)_2$ 为投资大的方案的净现金流量，CI、CO 为该方案的现金流入量、流出量；$(CI-CO)_1$ 为投资小的方案的净现金流量，CI、CO 为该方案的现金流入量、流出量；t 为时段，一般为年；n 为计算期；$DIRR$ 为差额投资内部收益率。

难以量化效益的方案经济比较方法 当各比较方案的效益相同，或效益基本相同，但难以具体估算时，可采用最小费用法（费用现值比较法和年费用比较法）。比较时，要注

意各方案的可比性，即各方案应同等满足电力系统的要求，以及具有相同的综合利用功效，方案间效益的差别，应由替代措施补足。

（1）费用现值比较法（简称现值比较法）。在同等满足电力系统要求下，费用现值较低的方案是可取的方案。费用现值（PW）的计算公式为

$$PW = \sum_{t=1}^{n}(I + C' - S_{v} - W)_{t}(P/F,\ i,\ t)$$

其中 $$(P/F,\ i,\ t) = \frac{1}{(1+i)^{t}}$$

式中 I 为全部投资（包括固定资产投资、流动资金和更新改造投资）；C'为年经营总成本；S_v为计算期末回收固定资产余值；W 为计算期末回收流动资金；$(P/F,\ i,\ t)$ 为折现系数；i 为综合贷款利率或电力工业基准收益率。

（2）年费用比较法。在同等满足电力系统要求下，等额年费用较低的方案是可取的方案。等额年费用（AC）的计算公式为

$$AC = \left[\sum_{t=1}^{n}(I + C' - S_{v} - W)_{t}(P/F,\ i,\ t)\right](A/P,\ i,\ n)$$

其中 $$(A/P,\ i,\ n) = \frac{i(1+i)^{n}}{(1+i)^{n}-1}$$

式中 $(A/P,\ i,\ n)$ 为资金回收系数。

中小型水电站方案初选的简化计算方法　计算静态差额投资收益率（R_a）或静态差额投资回收期（P_a）。当静态差额投资收益率大于或等于综合贷款利率或电力工业基准收益率，或静态投资回收期短于基准回收期时，投资大的方案较优。计算公式为

$$R_{a} = \frac{C_{1} - C_{2}}{I_{2} - I_{1}} \times 100\%$$

$$P_{a} = \frac{I_{2} - I_{1}}{C_{1} - C_{2}}$$

式中 C_1、C_2 为两个比较方案的年经营成本；I_1、I_2 为两个比较方案的投资（包括固定资产投资、流动资金和更新改造投资）。

shuidianzhan fuzhu shebei zidong kongzhi

水电站辅助设备自动控制 (automatic control of auxiliary equipment of hydropower station)

技术供水、排水、压缩空气和压力油系统等辅助设备的自动控制。实现自动控制的基本要求：①各部分自成独立系统，控制目标是维持水位、流量和压力等物理量在给定范围内。②除自动控制外，还能在现地手动控制，具有必要的事故和异常运行工况信号。③一般有工作设备和备用设备，工作设备不能满足工作要求时，备用设备自动投入。为了均衡磨损和防止潮气侵入，设备的工作或备用状态由人工选择或自动轮换。④被控对象为交流电动机，为了维持被控对象的控制系统的独立性，380V/220V 交流电动机的控制电源一般与电动机取自同一电源，当工作电动机和备用电动机由不同厂用电回路供电时，其公用控制回路要考虑电源自动切换。⑤用可编程控制器实现电站公用设备的自动控制，以获得更高的工作可靠性及更完善的控制逻辑，并便于与电站计算机监控系统连接。

技术供水系统自动控制　用于自动维持供水系统的水压和水量。其控制方式为：①以单台机组为单元建立的单元供水系统，与机组的起停同步起停。②以全厂机组或全厂用水设备为对象，建立的集中供水系统，随投入运行的机组台数的增减，分别投入或退出相应的水泵或管路。③当采用水泵供水时，水泵运行台数由主设备总耗水量决定；当供水总管的水压或流量不足时，自动投入备用泵。④当采用中间水池供水时，由水泵维持水位；当水位下降到下限值时，工作泵起动；水位继续下降到过低值时，备用泵起动；水位恢复正常，水泵停止。⑤当采用从水库或压力钢管等水源取水方式时，无须装设维持水压或流量的自动控制设备。（见水电站供水系统）

排水系统自动控制　用于将集中于集水井内的渗漏水自动排出厂外。其控制方式为：①当井内水位上升到上限值时，工作排水泵起动；②若水位继续上升到过高值时，自动投入备用排水泵；③待水位恢复正常，排水泵停止。如果电站检修排水采用自动控制，控制方式同渗漏排水。（见水电站排水系统）

压缩空气系统自动控制　用于将储气罐的气压维持在给定范围内。其控制方式为：①储气罐压力低于下限值时，工作空气压缩机起动。②当气压继续下降达过低值时，自动投入备用空气压缩机。③气压恢复正常时，停空气压缩机。④当设有空载起动电磁阀时，空气压缩机起动时该阀打开，空气压缩机起动后，该阀延时关闭。⑤空气压缩机出气管温度过高时，自动停机。⑥对于水冷式空气压缩机，运行时投冷却水；冷却水中断时，发信号并延时停机。⑦当设有油润滑系统时，油温过高发信号并延时停机。（见水电站压缩空气系统）

压力油系统自动控制　用于自动维持压油罐的压力及罐内的压缩空气量。压油泵的运行方式有连续式和断续式两种：①连续工作方式。工作油泵连续运行，油泵向压油罐供油由卸载阀控制。当压油罐压力降至工作下限时，油泵向压油罐供油；若油压恢复正常，工作油泵的卸载阀动作，工作油泵输出的压力油被卸载阀短路而排回油箱；若油压继续下降至过低值，则起动备用泵；当油压恢复正常时，停备用泵，工作泵的卸载阀动作，压力油被卸载阀短路与前述相同。②断续工作方式。压油罐油压降至下限值时起动工作泵；油压继续下降达过低值时起动备用泵；油压回升至上限值时停油泵。后一种方式有节省电能、减少油泵磨损等优点，但油泵电动机的频繁起动会缩短接触器和电动机的使用年限。

压油罐内需要补充压缩空气，其控制方式为：当压油罐油位上升到上限值且油压低于额定值时，打开补气阀补气；当油位低于下限或油压高于额定值时，关补气阀，停止补气。（见水电站油系统）

shuidianzhan gaoya peidian zhuangzhi

水电站高压配电装置 (high-voltage distribution device of hydropower station)

水电站从主变压器到输电线路之间所连接的电器和装置的总称。所连接的电气设备元件主要包括断路器、隔离开关、接地开关、电流互感器、电压互感器、避雷器、耦合电容器、阻波器、并联和串联电抗器、导体（母线或电缆）等。电压等级从 35kV 到 750kV。

高压配电装置俗称开关站，按结构形式可分为3种类型：①气体绝缘金属封闭开关设备（GIS）；②敞开式配电装置（AIS）；③混合式配电装置（H-GIS或半GIS）。对35kV和66kV配电装置，也可采用装配在封闭金属柜内的成套配电装置。布置在屋外时，需要考虑环境温度、湿度、风速、日照、冰雪、污秽、海拔、地质、地形、水文以及水电站水雾、泥雾等环境条件的影响。

气体绝缘金属封闭开关设备（GIS） 将断路器、隔离开关、接地开关、电流互感器、电压互感器、母线、避雷器、电缆终端（或出线套管）等开关设备元件，按电站电气主接线的要求，采用积木式结构，全部封闭于接地金属外壳中，壳体内充以SF_6气体绝缘介质，从而组合成一个开关设备整体，见图。其布置形式，按安装场所分为屋内型和屋外型，按断路器布置分为水平式和垂直式，按内部结构形式分为单相式和三相共筒式。GIS的优点有：①结构布置紧凑，占地面积和占用空间小。②设备运行可靠性高，使用寿命长。设备带电部分全部封闭于金属外壳内，绝缘性能不受周围大气条件的影响，消除了恶劣天气和小动物等引起的绝缘闪络及其他事故。随着其逐步国产化、价格下降的趋势，已成为中国水电站开关站设备布置的首选。中国水电站已投运的GIS最高电压为800kV，如拉西瓦水电站800kV GIS。对已投运GIS的运行统计表明，其可靠性与敞开式电器相比约为10∶1。③因金属外壳起隔离和屏蔽作用，不会发生人身触电危险，也不产生静电感应和无线电干扰。④安装工期短，检修间隔周期长。GIS年漏气率介于0.1%～1%，一般5～10年才需补气一次，维护工作量少，检修间隔周期一般可达10～15年。缺点是：①造价较高。②一旦内部故障，更换元件及大修比常规电器困难，检修时间长。



GIS设备

敞开式配电装置（AIS） 以空气作为绝缘介质，按电站主接线将单一功能的各种开关设备元件有规则地排列，组成一个完整的配电装置。分为屋内敞开式和屋外敞开式。水电站一般采用屋外敞开式，其在水电站中应用最早，技术上成熟，缺点是占地面积大、设备可靠性低。按设备布置安装高度和母线布置方式不同，可分为低型、中型、半高型和高型等。

低型布置 将设备直接布置在地面上，设备周围设置栅栏，操作机构则设在栅栏之外。这种布置方式的优点是：安装维修方便、节省支架；安装维修时的高空作业少；由于设备重心低，抗震效果也好。缺点是：占地面积太大，受地面尘土污染较严重。低型布置只适用于110kV及以下或地震烈度较高的地区，由于成套开关柜和GIS配电装置的出现，该布置有被淘汰的趋势。

中型布置 将设备布置在支架上，使带电部分对地保持一定距离，运行人员能安全地在地面进行巡视和操作。这种布置方式的优点是布置清晰，运行维护方便；缺点是占地面积较大。中型布置是最常用的一种布置方式，能适用于各种电压等级的各种主接线，具有较成熟的设计和运行经验。

半高型布置 将隔离开关布置在上层，其他设备仍采用中型布置，通过部分设备重叠布置以缩短纵向尺寸，隔离开关操作机构仍可在地面上进行操作。这种布置方式的优点是节省占地面积，与中型布置相比，一般可压缩占地面积45%～50%；缺点是隔离开关维护不便，土建结构较复杂，抗震性能较差等。

高型布置 将两组母线上下重叠布置，母线隔离开关对应地放在各层母线下方，其他设备仍按中型布置方式布置在地面。高型布置比典型中型布置占地面积小。缺点是：土建结构复杂，构架耗量大，维护检修不便，特别是当上层母线或设备检修时，对下层设备要采取必要的防护措施，抗震性能差等。

混合式配电装置（H-GIS） 20世纪70年代出现的一种开关站布置形式，布置上介于AIS与GIS之间，是以断路器为主体，与其他隔离开关、接地开关、电流互感器、电压互感器、避雷器等开关设备元件组合在一起的紧凑型单相组合电器，封闭在金属外壳内，壳内充以SF_6气体绝缘介质。其主要特征是不带SF_6管道母线，而是利用出线空气套管通过软导线与敞开式母线连接，按电站主接线的要求组成的屋外配电装置。由于出线套管为空气绝缘，设备相间距离仍与常规敞开式高压电器相同，但大大缩小了设备之间的纵向尺寸，其纵向尺寸约为敞开式配电装置的40%，因此具有结构紧凑、占用场地少的特点。

H-GIS综合了AIS与GIS两者的优点，与AIS相比，减少了开关站占地面积；与GIS相比，既能减少投资，又便于架空引出线，故自20世纪90年代后期得到迅速发展，在户外高压和超高压配电装置中的应用越来越广泛。中国水电站中也多有采用，如吉沙水电站220kV H-GIS、水口水电站500kV H-GIS。

shuidianzhan gongcheng zaojia

水电站工程造价 (cost of hydropower project)

建设水电站所花费的以货币量表现的费用总和。即投资者进行水电站工程建设的全部投资，与工程总投资同义。是进行项目投资决策、筹集建设资金、投资控制管理以及投资效果评价的重要依据。

沿革 中华人民共和国成立以来，中国水电站工程造价管理参照苏联概预算制度的模式。其基本要点是：不同设计阶段须编制匡算、估算、概算和预算等概预算文件；概预算文件依据国家或行业颁发的定额和费用标准，按照规定的编制方法进行编制；经审批的概预算文件是基本建设的重要文件。概预算制度下，水电站工程采用自营建设方式，实行“实报实销”或“概算承包”，建设资金高度集中管理，满足

了计划控制使用的要求，也限制了建筑市场开放和招标竞争；定额的统一性和综合性体现了社会平均水平，但对准确表现项目成本的个性有所限制。1984 年，鲁布革水电站建设率先在中国基本建设领域推行工程招投标。20 世纪 90 年代，招投标制度在水电站建设中全面推开，自营建设方式基本中止。工程造价管理中除仍需编制匡算、估算、概算外，在工程实施阶段通过招投标建立控制目标，由项目建设法人实施控制管理。利用外资和国外承包商的引进，使中国水电站工程造价管理制度汲取了西欧北美国家造价管理的理念和经验。水电站工程造价管理的改革和发展的目标，是研究制定内容完整、构成明晰、标准合理、方法得当且适合中国国情的造价标准体系，做好全过程造价管理。

特点　水电站工程造价具有单件性、多次性和组合性等计价特点。水电站建设受水文、气象、地质和地貌等自然条件影响，建设规模、结构造型设计的差异性大，不同地区造价要素（包括人工、材料、设备、施工机械等）的价格水平也有差异，必须单件设计、单件计价。由于建设周期长，设计与建设分阶段逐步加深，造价预测和控制通过多次计价来贴近实际值，而不是一次完成。多个独立发挥生产能力的单项工程组成水电站工程，单项工程又分解为能够独立施工的单位工程，单位工程又分解为分部分项工程，分部分项工程是可以计量、测定和计算的基本单元，工程造价从基本单元开始，自下而上地组合而成。

分类　水电站工程造价按照实现过程分类。规划阶段有投资匡算，预可行性研究阶段有投资估算，可行性研究阶段有设计概算，招标设计阶段有标底、投标报价、合同价，施工详图设计阶段（或称施工建设阶段）有合同价款结算，必要时编制调整概算，竣工验收阶段有竣工决算。随着工程建设的深入，后一阶段造价比前一阶段更加逼近实际值。

构成　水电站工程造价按费用性质划分为建筑安装工程费、设备购置费和其他费用。建筑安装工程费是用于水电站建筑施工及设备安装的工程费用，由直接费、间接费、企业利润和税金构成。设备购置费是建设水电站需购置或者自制的达到固定资产标准的各种国产或者进口设备、工具、器具的费用，由设备原价、运杂费、运输保险费和采购及保管费等构成。其他费用是在建筑安装工程费和设备购置费之外，建设水电站所必需的其他费用，如项目建设管理费、生产准备费、科研勘察设计费等。

按照建设项目通常做法，水电站工程造价（即工程总投资）可分静态投资和动态投资两部分，如图所示。根据水电站工程特点，工程静态投资由枢纽工程投资、建设征地移民安置补偿费用、独立费用和基本预备费构成。其中，枢纽工程投资又包括施工辅助工程投资、建筑工程投资、环境保护和水土保持工程投资、机电设备及安装工程投资、金属结构设备及安装工程投资 5 项。建设征地和移民安置补偿费用包括农村部分补偿投资、城市集镇部分补偿投资、专业项目投资、库底清理投资、环境保护和水土保持工程投资 5 项。独立费用包括项目建设管理费、生产准备费、科研勘察设计费、其他税费 4 项。工程动态投资包括价差预备费和建设期利息两部分。

计价依据　用以计算水电站工程造价的基础资料的总称。包括定额、费用标准、基础价格、工程量清单和造价指数等。



水电站工程造价的组成

shuidianzhan gongye dianshi xitong

水电站工业电视系统

水电站工业电视系统　(industry television system of hydropower station)　利用视频探测技术监视水力发电厂生产过程、设备运行场所及安全设防区域，实时显示、记录现场图像的系统。水电站工业电视系统的配置可根据水电站的枢纽布置，结合监视对象的环境条件、运行维护、监视级别等因素统筹考虑，并可与水电站门禁系统和火灾自动报警系统联动。

系统构成　由前端设备、传输设备、处理/控制设备以及记录/显示设备 4 个主要部分组成。前端设备包括摄像机及与之配套的镜头、云台、防护罩、解码驱动器等。传输设备包括电缆和/或光缆以及信号传输设备、放大器、均衡器、均衡放大器等。处理/控制设备包括视频矩阵切换器、数字视频主机、云台/镜头控制器、媒体服务器、操作键盘、各类控制通信接口、电源和与之配套的控制台、监视器等。记录/显示设备包括监视器、刻录机和/或录像机、存储服务器和磁盘阵列、多画面分割器等。

结构模式　根据对视频图像信号处理/控制的方式不同而主要分为模拟视频监控、数模结合视频监控和数字视频监控，3 种模式的硬件配置也不尽相同。

模拟视频监控　摄像机采集的模拟信号经同轴电缆接至视频矩阵装置，若距离较长，则利用放大/均衡器，或采用光缆配以视频光端机传输。视频信号由视频矩阵装置输出直接接至图像监视器，同时可以采用录像机存储历史图像。

数模结合视频监控　摄像机采集的模拟图像信号经视频分配器分成两路，一路送至视频矩阵切换装置并可输出图像至监视器，另一路送至硬盘录像机，进行 MPEG 格式录像，录像格式有 MPEG-2、MPEG-4 或 H.264 可选。前端摄像机的控制由视频矩阵来完成，硬盘录像机可进行录像，也可以调用数字图像进行回放。

数字视频监控　分为两种情况：一种是前端摄像机输出模拟信号，在现地通过视频编码器直接进行视频数字压缩，然后利用交换机组成视频网络；另一种是采用 IP 摄像机，

直接输出数字视频信号接入交换机组成视频网络。若距离较远，则采用光缆配以光端机传输。在网络视频管理服务器和其他多媒体工作站上可以控制和调用所有数字图像信号。

工业电视系统作为水电站辅助集中监控手段，为电厂生产运行、消防监控及必要的安全警卫提供支持。主要监视点有主厂房各层及安装间，主变压器室，高低压配电装置室，母线室，电缆夹层，集水井及排水廊道，中控室、计算机室、继电保护室、直流盘室和蓄电池室，通信设备、通信电源室，升压站、开关站和出线场，坝顶、进水口、溢洪道进口，尾水，重要通道、门厅、电梯轿厢以及其他有必要的安装地点等。

shuidianzhan gongshui xitong

水电站供水系统 (water supply system of hydropower station) 为满足水电站机电设备运行和人员生活所需各类用水，由水源、水泵（采用水泵供水时）、水净化设备以及相应管网、控制阀件、监测和控制元件等组成的系统。水电站供水系统分为技术供水系统、生活供水系统和消防供水系统。

技术供水系统 为水电站机电设备的正常运行提供冷却水、润滑水等，各供水对象对水质的要求不同。水电站典型技术供水系统见图。

（1）冷却水供水对象主要有：①发电机空气冷却器；②机组的各轴承油冷却器；③调速器油压装置的回油箱；④变压器油冷却器；⑤水内冷发电机的二次水冷却器；⑥水冷式空气压缩机；⑦空调喷水装置等。

（2）润滑水供水对象主要有：①水轮机橡胶轴承；②水轮机主轴密封；③转轮密封间隙；④深井泵轴承等。与冷却水相比，润滑水对水质的要求更高。

技术供水方式 主要有自流供水、水泵供水、混合供水、顶盖取水或厂外其他水源取水等方式。

（1）自流供水。直接从水库、压力钢管取水供给，适用于水头为15～70m的电站；当水头为70～160m时，也常用装设减压设备的自流供水。自流供水简单、运行可靠、维护方便。

（2）水泵供水。利用水泵自蜗壳、尾水或其他水源取水供给，适用于水头大于80m或小于12m的电站。

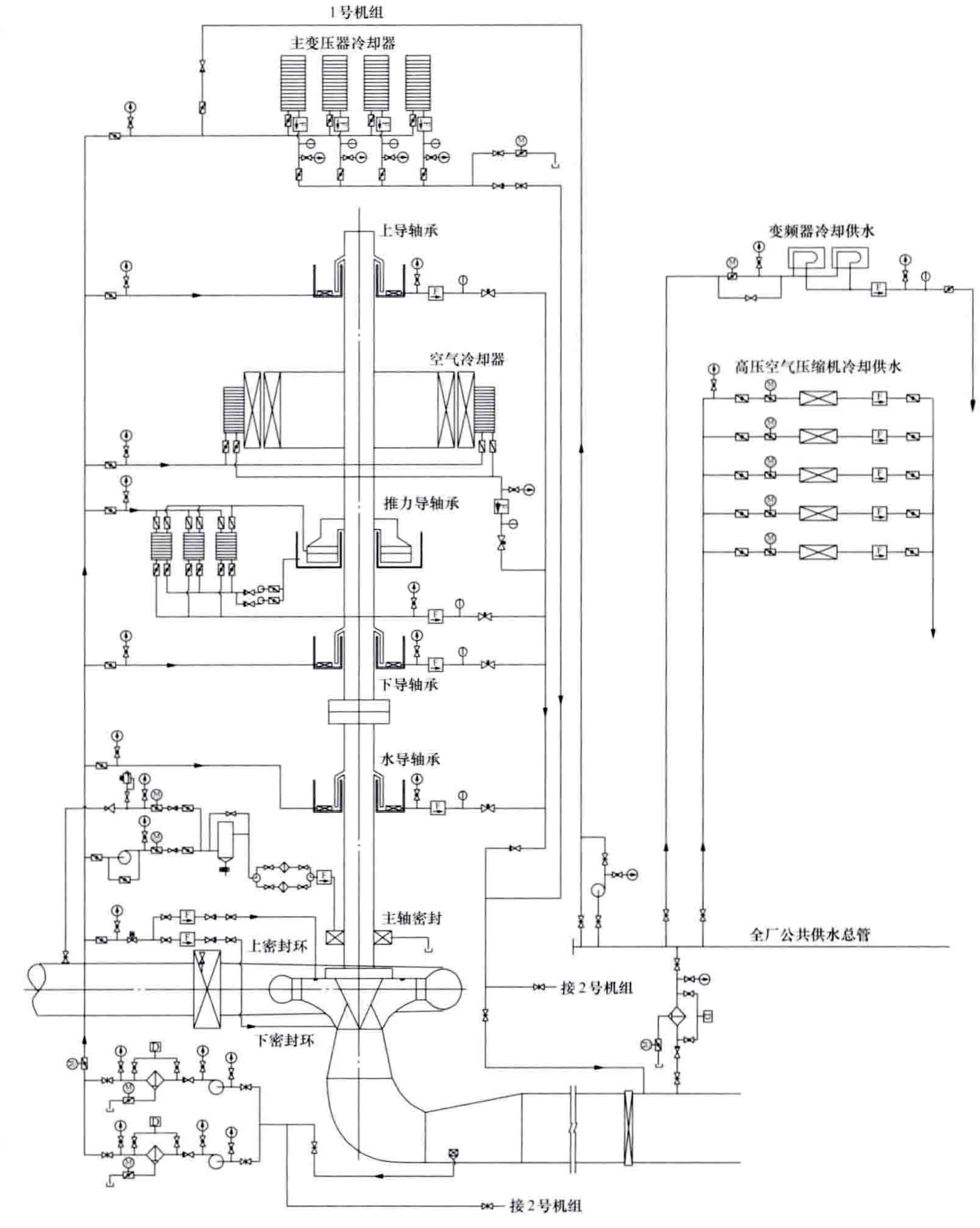
（3）混合供水。兼有自流和水泵供水两套设备的供水方式，适用于水头为12～20m或水头变幅很大的水电站。

（4）顶盖取水供水。自混流式水轮机顶盖上引取具有一定压力的转轮上迷宫环泄漏水供给，一般适用于采用混流式水轮机且水头大于70m以上的水电站。

技术供水系统形式 主要有单元供水系统和集中供水系统两种。

（1）单元供水系统。以单台机组为单元建立的供水系统。

（2）集中供水系统。以全厂机组或全厂用水设备为对象



水电站典型技术供水系统示意图

集中建立的供水系统，随电站投入运行的机组台数的增减，分别投入相应的水泵或管路。

生活供水系统 为水电站人员提供生活及清洁用水，水质应满足卫生要求。

消防供水系统 为满足水电站水消防设备用水需要而设置的供水系统。消防水供水对象主要有发电机、变压器、油罐及油处理室、建筑物等。

shuidianzhan guanli xinxi xitong

水电站管理信息系统

(management information system of hydropower station) 通过采用计算机系统、网络通信等信息技术，以提高设备资产维护管理水平、保障设备安全可靠运行和降低发电成本为目标所构建的，以设备资产管理为核心，覆盖水电站发电生产全过程的电力生产管理信息系统。

水电站管理信息系统通常由电站设备维护管理、电站运行管理、安全可靠性管理、物资管理、计划合同管理、财务管理、人力资源管理、文档管理等既相对独立，又密切相关的多个模块组合构成。

电站设备维护管理 通常包括以设备生命周期管理为基础的设备基础台账管理、预防性维护管理、与实时控制系统相关联的设备缺陷与维修工单管理、设备运行成本分析等方面。

电站运行管理 通常包括运行方式管理、生产调度管理、设备现场巡视管理、值班管理、地线及其他安全措施管理等。

安全可靠性管理 通常包括设备设施安全状况评估管理、安全活动管理、安全事故与安全指标管理、与实时系统关联的设备可靠性管理等。

物资管理 通常包括与设备维护相关联的常规消耗性材料、备品备件等的定额管理、采购、仓储及出入库管理。

计划合同管理 通常包括计划与预算管理、项目过程管理、招投标管理、合同管理和供应商管理等。

财务管理 通常包括凭证管理、总账管理、物资核算、应付账管理、资产核算、资产实物管理等。

人力资源管理 通常包括组织管理、员工管理、招聘管理、培训管理、考勤管理、薪酬福利管理等。

文档管理 通常包括与其他子系统密切相关的文档基本信息维护、文档审批与发放管理、文件归档管理、文档版本管理等。

shuidianzhan guomin jingji pingjia

水电站国民经济评价

(national economic evaluation of hydropower station) 按照资源合理配置的原则，从国家整体利益角度考察水电站建设项目的效益和费用，用影子价格、影子工资、影子汇率和社会折现率等经济参数分析、计算项目对国民经济的净贡献，评价项目的经济合理性。国民经济评价是水电建设项目经济评价的重要组成部分，是评价水电项目的建设在经济上合理与否的重要手段，其评价结论是水电立项建设的主要依据，国民经济评价结论不可行的项目，一般应予否定。

国民经济评价所考察的效益是指项目对国民经济所做的贡献（即产出），包括直接效益和间接效益。直接效益是指由项目产出物产生并在项目范围内计算的经济效益，包括发电效益和综合利用效益；间接效益则是指由项目引起而在直接效益中未得到反映的效益，包括促进当地及供电区经济发展、生态环境改善等。（见水电站效益）

关于效益计算，多用功能相同的合理的替代方案的费用作为本电站的效益。对于具有综合利用效益的水电站，原则上各部门的效益都应计算在内综合分析。若某些部门的效益难以确切用货币表示，也可先进行费用分摊，然后分部门进行经济分析评价。（见综合利用工程费用分摊）

国民经济评价所考察的费用是指国民经济为项目所付出的代价（即投入），包括直接费用和间接费用。直接费用是指项目使用投入物所产生并在项目范围内计算的经济费用，包括建设投资和生产期的运行费用（见水电站发电成本）；间接费用则是指由项目引起而在项目的直接费用中未得到反映的费用。

项目的间接效益和间接费用统称外部效果，对显著的外部效果能定量的要定量分析，计入项目的效益和费用；不能定量的，应作定性描述。外部效果不能重复计算或漏算。

国民经济评价不包括不发生实际资源的增加和耗用，而是国民经济内部“转移支付”的效益和费用，如国家对项目的补贴、项目向国家交纳的税金等。

国民经济评价原则上都应该使用影子价格，以正确计算项目对国民经济所作的净贡献。影子价格是指当社会经济处于某种最优状态下时，能够反映社会劳动消耗、资源稀缺程度和对最终产品需求情况的价格。影子价格应在宏观优化规划的基础上分析采用。当缺乏宏观规划时，也可按市场价格修正采用，使之尽量接近其价值。在不影响评价结论的前提下，为简化计算，可只对其价值在效益或费用中占比重较大，或者国内价格明显不合理的产出物和投入物使用影子价格。对项目投入物和产出物的影子价格，可按外贸货物、非外贸货物和特殊投入物3种类型计算。

国民经济评价应使用劳动力的影子工资、土地的影子费用、外汇的影子汇率等，计算经济净现值等指标的折现率参数采用社会折现率。这些参数由国家统一测定发布。

国民经济评价采用的各种基础资料，如枢纽方案及其工程量、投资和运行费用及能量指标等务求客观和准确，并在同一基础上，以免评价结果失真。

国民经济评价内容包括效益和费用计算、国民经济评价指标计算及不确定性分析等。

效益和费用计算 基本原则和方法包括：

(1) 水电建设项目在国民经济评价中，水电站的效益计算一般与电力系统负荷预测、电源规划、电力电量平衡等工作结合起来进行，要根据电力系统“有”“无”拟建水电站的原则，比较电力系统整体效果的变化，作为拟建水电站的效益进行经济评价。

(2) 在水电站效益量化上有两种方法可以采用：①采用同等程度满足电力系统的电力和电量需要，按“有”“无”原则计算的电力系统差别，合理选择替代方案，并在原则上用影子价格计算替代方案的费用，作为拟建水电站的发电效

益，即国民经济评价的替代分析法。②直接按电力系统吸收拟建水电站的发电量，采用电量（作为产出物）影子价格计算发电效益，即国民经济评价的投入产出法。采用该法计算时，还补充计算投资净效益率指标，即项目达到设计生产能力后的一个正常生产年份的年净效益（生产期内各年净效益变化较大时，则用生产期年平均净效益）与全部投资的比值，它反映项目投产后单位投资对国民经济所作的年净贡献，属静态指标。

考虑到项目的影子价格尤其是作为产出物的影子电价的计算比较复杂，计算方法也不太成熟；另外，水电的效益除了电量效益外，还有难以用影子价格计算的容量效益。因此，在水电的国民经济评价中，经常采用替代分析法。

（3）在国民经济评价的计算期内，特别是涉及拟建水电站的电网规划期内，如果在本流域或本电力系统中有其他拟建水电站或水利工程投入，并在效益和费用上相互有影响时，应按其投入并起作用的时间参与计算。

（4）水电站的效益往往是多方面的，除发电量外，还有容量效益；有灌溉、航运、防洪等综合利用功能的水电站还有综合利用效益等。这些效益应以同等效益的替代方案的影子费用，作为该项目的补充效益；或采用影子价格计算该项目的补充效益，参与国民经济评价。

国民经济评价指标计算　国民经济评价以经济内部收益率为主要评价指标，根据项目特点和实际需要，也可计算经济净现值等指标。

（1）经济内部收益率（economic internal rate of return，EIRR）。项目在计算期内各年经济净效益流量的现值累计等于零时的折现率，即

$$\sum_{t=1}^{n}(B-C)_t(1+EIRR)^{-t}=0$$

式中 B 为效益流入量；C 为费用流出量；$(B-C)_t$ 为第 t 年的净效益流量；n 为计算期。

经济内部收益率是反映项目对国民经济净贡献的相对指标，当它等于或大于社会折现率时，则表明项目对国民经济的净贡献达到或超过了要求的水平，项目可以接受。

（2）经济净现值（economic net present value，ENPV）。用社会折现率将项目计算期内各年的净效益流量折算到建设期初的现值之和。也可计算经济净现值率（economic net present value ratio，ENPVR），即经济净现值与投资现值之比

$$ENPV=\sum_{t=1}^{n}(B-C)_t(1+i_s)^{-t}$$

$$ENPVR=\frac{ENPV}{I_p}$$

式中 i_s 为社会折现率；I_p 为投资（包括固定资产投资和流动资金）的现值。

经济净现值是反映项目对国民经济净贡献的绝对指标，当它等于或大于零时，表示国家为拟建项目付出代价后可以得到符合社会折现率的社会盈余，或除得到符合社会折现率的社会盈余外，还可以得到以现值计算的超额社会盈余，项目可以接受。经济净现值率是反映项目对国民经济净贡献的相对指标。

国民经济评价不确定性分析　在水电站国民经济评价中，除计算主要指标外，考虑到项目有些数据来自预测和估算，有一定程度的不确定性，因而需要分析不确定因素对国民经济评价指标的影响，进行不确定性分析，以预测项目可能承担的风险。不确定分析一般是进行敏感性分析，对于国民经济评价来说，有时也进行概率分析。

（1）国民经济评价的敏感性分析是通过分析、预测水电建设项目主要因素发生变化时，对国民经济评价指标的影响，从中找出敏感因素，并确定其影响程度。对于水电站来说，影响其国民经济评价指标的主要因素一般有固定资产投资、建设期、电站上网的有效电量、容量及其他动态效益和综合利用效益、替代方案投资、替代方案（主要指火电）的燃料价格或燃料费等，需要分析这些因素单独变化或多因素同时变化时对经济内部收益率的影响。可以通过绘制敏感性分析图，分析影响因素按一定比例变化时引起评价指标的变动幅度，或求评价指标达到临界点（即经济内部收益率等于社会折现率），允许某因素变化的最大幅度，如果影响因素超过该极限，则项目不可行。

（2）国民经济评价在有条件时，还可以进行概率分析。这是使用概率研究预测不确定因素和风险因素对水电建设项目国民经济评价指标影响的一种定量分析方法。一般是计算项目经济净现值的期望值及净现值大于或等于零时的累计概率，供项目决策参考。

shuidianzhan guodianya baohu he jueyuan peihe

水电站过电压保护和绝缘配合　(overvoltage protection and insulation coordination of hydropower station)

水电站中防护和限制超过正常运行电压并对电气设备绝缘有危险的电压升高，以保护电气设备绝缘免受损害。按系统出现的各种过电压和保护装置的特性，来确定电气设备的绝缘水平，以减少绝缘损坏事故。水电站电气设备承受的各种电压见表1。

表1　水电站电气设备承受的各种电压

<table>
<tr><th colspan="3">正常运行时的工频电压</th></tr>
<tr><td rowspan="3">雷电过电压</td><td colspan="2">直击雷过电压</td></tr>
<tr><td colspan="2">感应雷过电压</td></tr>
<tr><td colspan="2">侵入雷电波过电压</td></tr>
<tr><td rowspan="6">暂时过电压</td><td rowspan="3">工频过电压</td><td>空载长线电容效应</td></tr>
<tr><td>发电机突然失去负荷</td></tr>
<tr><td>电网单相接地故障</td></tr>
<tr><td rowspan="3">谐振过电压</td><td>线性谐振过电压（消弧线圈补偿电网、变压器电容传递、高压并联电抗器非全相运行引起）</td></tr>
<tr><td>参数谐振过电压（自励磁、自参数谐振、水轮发电机不对称短路引起）</td></tr>
<tr><td>铁磁谐振过电压（电磁式电压互感器、非全相运行的空载或轻载变压器引起）</td></tr>
<tr><td rowspan="4">操作过电压</td><td colspan="2">中性点不接地系统间歇性电弧接地过电压</td></tr>
<tr><td colspan="2">空载线路分、合（重合）闸过电压</td></tr>
<tr><td colspan="2">空载变压器和并联电抗器分闸过电压</td></tr>
<tr><td colspan="2">线路非对称故障分闸和振荡解列过电压</td></tr>
</table>

正常运行时的工频电压 水电站电气设备正常运行时的工频电压（即正常运行电压），为电站接入电力系统的标称电压以及相对应的系统最高工作电压，见表2。

表2 电力系统标称电压和最高工作电压

系统标称电压（kV，有效值）	3	6	10	35	66	110	220	330	500	750
系统最高工作电压（kV，有效值）	3.6	7.2	12	40.5	72.5	126	252	363	550	800

雷电过电压保护 水电站电气设备可能遭受雷电直击、雷电感应或雷电侵入波引起的过电压。雷电过电压保护分为直击雷保护、感应雷保护和侵入雷电波保护。

直击雷过电压保护 雷直击在水电站电气设备上将产生很高的直击雷过电压，会造成电力设备的损坏，一般采用避雷针、避雷线和避雷带进行保护。水电站的屋外配电装置，电站地面厂房，油处理室，露天油罐以及易燃、易爆材料仓库等一般均装有直击雷保护装置。

避雷针（线、带）由接闪器、接地引下线和接地体三部分组成，是一个释放雷电荷的良好通道。避雷针与避雷线和避雷带的不同之处在接闪器的结构，一个是针状导体，一个是水平线状导体。当被保护物附近上空雷云先导发展到距地面或被保护物体一定高度时，由于避雷针（线、带）高出地面和被保护物体，影响雷云电场发生畸变，引导雷云先导向其自身发展，在绝大多数情况下雷击于避雷针（线、带），而不击于处在避雷针（线、带）保护范围内的设备。

感应雷过电压保护 雷击附近物体或地面，由于空间电磁场发生剧烈变化，在线路的导线上或其他金属导体上会产生感应过电压，一般采用电容器、避雷器进行保护。感应雷过电压对35kV及以下系统绝缘有危害。一般35kV及以下配电装置电气设备应远离可能遭到直击雷的设备（避雷针、避雷线）和较高的建筑物，设备金属外壳、电缆金属外皮和金属构件等均应接地。当感应雷过电压对设备绝缘有危害时，应适当增大电气设备对地的电容量或采用避雷器进行保护。

侵入雷电波过电压保护 输电线路受到雷击，雷电波沿导体侵入水电站内电气设备上，将产生雷电波过电压，一般采用电容器、避雷器以及相应的进线保护段进行保护。侵入雷电波过电压幅值与水电站进线保护段的耐雷水平、雷击点距配电装置的距离、导线电晕衰减、水电站接线、运行方式、设备布置以及避雷器配置有关。水电站内高压配电装置的避雷器配置因接线不同而不同：桥形接线和角形接线的配电装置，避雷器宜配置在送电线路入口处；单母线和双母线接线的配电装置，避雷器宜配置在主母线上，当有旁路母线投运时，出线设备不在主母线避雷器保护范围内，应在旁路母线上设置一组避雷器；一倍半接线的220kV及以上配电装置，避雷器宜配置在进出线的入口处，如有的设备不在避雷器的保护范围内，可在母线上适当位置增设避雷器。当变压器远离高压配电装置，又不在配电装置避雷器保护范围内时，应在变压器附近设置一组避雷器。对于比较复杂的电气接线和具有电缆的电气接线以及500kV电气接线，雷电侵入波保护的避雷器配置应采用惯用法进行数值计算。所有避雷器应以最短的接地线与配电装置的主接地网连接，同时应在其附近设置集中接地装置。

与架空线路连接的三绕组自耦变压器、变压器（包括1台变压器与2台发电机相连的三绕组变压器）的低压绕组如有开路运行的可能和水电站双绕组变压器当发电机断开由高压侧倒送厂用电时，为防止变压器高压绕组雷电波的静电感应危及低压绕组绝缘，需在靠近变压器低压绕组出线上安装一组避雷器。

与架空线路直接连接的直配发电机，保护方式应根据发电机容量、雷电活动强弱和运行可靠性的要求确定，需采用电缆段、电感线圈、电容器和避雷器进行联合保护。对发电机出口电压10.5kV及以下的直配发电机，如需向近区供电且负荷较小，可采用1∶1的隔离变压器供电。

在多雷区，经变压器与架空线路连接的非直配发电机，变压器高压侧的系统标称电压为66kV及以下时，来自变压器高压绕组的雷电侵入波传递至发电机的电磁感应电压已超过发电机的绝缘水平，应在发电机出口装设一组避雷器；系统标称电压为110kV及以上时，发电机出口是否装设避雷器应经校验确定，必要时可装设避雷器保护。

暂时过电压的限制 电力系统发生故障或操作时会产生具有工频性质的暂时过电压，其幅值和持续时间与系统结构、容量、参数、运行方式，以及各种安全自动装置的特性有关。除增大设备绝缘承受暂时过电压外，还对选择过电压保护装置有重要影响。暂时过电压有工频过电压和谐振过电压。

工频过电压限制 系统中工频电压升高是操作过电压的强制分量，主要由空载长线电容效应、发电机突然失去负荷和电网单相接地故障等引起。工频电压升得越高，对应的操作过电压也越高，因此，需对工频过电压加以限制。各级电压系统允许工频过电压水平不宜超过表3中所列数值。220kV及以下系统中，由于绝缘水平较高，能承受可能出现的操作过电压，一般不采取措施限制工频过电压。

表3 工频过电压水平允许值

电压系统		电压水平允许值
3～20kV系统		$1.9U_{xg}$
35～66kV系统		$\sqrt{3}U_{xg}$
110～220kV系统		$1.3U_{xg}$
330～750kV系统	线路断路器母线侧	$1.3U_{xg}$
	线路断路器线路侧	$1.4U_{xg}$

注：$U_{xg}=U_m/\sqrt{3}$，其中U_{xg}为系统工作相电压，U_m为系统最高电压，kV。

330kV及以上系统中，线路较长时，在正常送电状态下突然失去负荷或在线路受电端有接地故障情况下突然失去负荷时，可能产生幅值较高的工频过电压。当工频电压升高超过容许值时，一般采用在线路上适当位置安装并联电抗器加以限制，也可在线路上架设良导体避雷线降低工频过电压。

谐振过电压限制 各级电压系统均应采取措施，防止在电力系统操作和故障情况下，由于电感、电容参数的不利组合引起的谐振过电压。谐振过电压一般具有工频性质，持续时间较长，对系统中电气设备的绝缘危害极大。谐振过电压不能采用避雷器进行限制，应尽量调整系统参数，避免在各级电压系统中出现谐振过电压，或者采用保护装置限制过电

压幅值和缩短持续时间。水电站产生的谐振过电压一般有线性谐振过电压、参数谐振过电压、铁磁谐振过电压。

（1）线性谐振过电压。在系统操作或发生故障的情况下，由于电感、电容参数的不利组合使系统发生谐振而引起的谐振过电压，其谐振的参数均为线性。一般线性谐振过电压有消弧线圈补偿电网过电压、变压器电容传递过电压、高压并联电抗器非全相运行过电压。

（2）参数谐振过电压。由于参数本身的变化引起参数不利的组合使系统发生谐振而引起的谐振过电压。参数谐振过电压有自励磁过电压、自参数谐振过电压、水轮发电机不对称短路过电压。

（3）铁磁谐振过电压。具有铁芯电感元件的设备，因系统操作或发生故障引起设备上电压升高或产生励磁涌流，都会导致铁芯饱和。在谐振频率下，当感抗与容抗值相等时，就会引起铁磁谐振过电压。铁磁谐振过电压有电磁式电压互感器引起的铁磁谐振和非全相运行的空载或轻载变压器引起的铁磁谐振两种。

操作过电压保护 电力系统发生故障或操作的瞬时，由于稳态电压的变化而产生电压自由振荡所形成的过电压。操作过电压种类较多，水电站常遇到的操作过电压有间歇性电弧接地过电压，空载线路分、合（重合）闸过电压，空载变压器和并联电抗器分闸过电压，线路非对称故障分闸和振荡解列过电压等。

间歇性电弧接地过电压 在中性点不接地系统中，当单相接地故障电流超过一定数值时，将产生不稳定电弧，形成熄灭和重燃交替的间歇性电弧，导致电磁能的强烈振荡，并在健全相以至故障相中产生较高的过电压。过电压数值随接地方式不同而异，一般情况下中性点绝缘系统不超过 $3.5U_{xg}$，消弧线圈接地系统不超过 $3.2U_{xg}$，电阻接地系统不超过 $2.5U_{xg}$。由于持续时间较长，对设备绝缘有危害，应尽量避免发生。对持续时间较短的电弧接地过电压，可采用无间歇金属氧化物避雷器加以保护。

空载线路分、合（重合）闸过电压 空载线路在分闸过程中，当断路器触头间的绝缘恢复强度低于电压恢复强度时，断路器发生一次或多次重击穿，使线路上电压发生振荡，产生分闸过电压。重燃相位和电弧熄灭角度都具有随机性，呈正态分布。空载线路分闸过电压是控制 220kV 及以下系统操作过电压绝缘水平的主要依据。对 3～66kV 中性点不接地系统，空载线路分闸过电压一般不超过 $4.0U_{xg}$；对 110～220kV 中性点接地系统，一般不超过 $3.0U_{xg}$。采用不重击穿断路器是限制分闸过电压的有效措施。线路侧采用电磁式电压互感器，可泄放线路上的残余电荷，降低触头间恢复电压，避免断路器重击穿或降低重击穿过电压。330kV 及以上系统应采用不重击穿断路器。

空载线路合闸时，由于合闸瞬间电源电压和线路电压不等而导致线路发生电感、电容振荡，产生合闸过电压。线路重合闸时，由于电源电动势与线路上残余电荷的反极性，加剧了这一电磁振荡过程，使过电压进一步增高。空载线路合（重合）闸过电压是控制 330kV 及以上系统操作过电压水平的主要依据，必须将其限制在系统允许的操作过电压范围内。限制合（重合）闸过电压的措施有：①采用无间隙金属氧化物避雷器保护；②采用避雷器限制达不到要求时，可选用具有合闸电阻的断路器；③采用人工智能电压过零合闸装置。

空载变压器和并联电抗器分闸过电压 空载变压器和并联电抗器分闸时，由于断路器强制熄弧引起电磁能转换振荡而产生的过电压。采用灭弧性能较强又无分闸电阻的断路器，断开励磁电流标幺值较大的空载变压器时，会产生较高幅值的过电压，可在断路器与变压器（并联电抗器）之间装设避雷器予以限制。

线路非对称故障分闸和振荡解列过电压 系统送受端联系薄弱，如线路因非对称故障导致分闸，或在系统振荡状态下解列，将产生线路非对称故障分闸或振荡解列过电压。当过电压幅值较高时，应采用线路避雷器加以限制。

根据系统运行的统计，各级电压系统允许操作过电压水平不宜超过表 4 中所列数值。

表 4 操作过电压水平允许值

对地绝缘	3～66kV	$4.0U_{xg}$
	110～220kV	$3.0U_{xg}$
	330kV（2%统计过电压）	$2.2U_{xg}$
	500kV（2%统计过电压）	$2.0U_{xg}$
	750kV（2%统计过电压）	$1.8U_{xg}$
相间绝缘	3～220kV	$(1.3\sim1.4)U_{xg}$
	330～750kV	$1.5U_{xg}$

绝缘配合 确定电气设备的绝缘水平，以适应电力系统采取各种保护措施后可能出现的各种过电压的数值，使绝缘损坏事故率减少到电力系统可以接受的程度，并做到技术、经济合理。电气设备的绝缘配合有雷电过电压绝缘配合和操作过电压绝缘配合。

雷电过电压的绝缘配合 对电气设备雷电过电压的绝缘配合主要有相对地绝缘配合和相间绝缘配合。

（1）相对地绝缘。对受避雷器保护的设备，其额定全波雷电冲击耐受电压由避雷器的雷电冲击保护水平乘以配合系数 1.4 计算选定。截波雷电冲击耐受电压为全波雷电冲击耐受电压的 1.1 倍或高一级绝缘水平。

（2）相间绝缘。相间绝缘的额定雷电冲击耐受电压均取相应的相对地绝缘的耐受电压值。330kV 及以上开关设备纵绝缘的额定雷电冲击耐受电压为相对地额定雷电冲击耐受电压加反极性的工频电压幅值。

操作过电压的绝缘配合 对电气设备操作过电压的绝缘配合主要有相对地绝缘配合和相间绝缘配合以及开关设备纵绝缘配合。

（1）相对地绝缘。对 220kV 及以下设备，其额定短时工频耐受电压由统计操作过电压水平或避雷器的操作冲击保护水平乘以配合系数 1.15 折算工频电压选定。对 330kV 及以上设备，其额定操作冲击耐受电压由统计操作过电压水平或避雷器的操作冲击保护水平乘以配合系数 1.15 计算选定。

（2）相间绝缘。对 220kV 及以下设备，其相间绝缘的额定短时工频耐受电压均取相应的相对地额定短时工频耐受电压值。对 330kV 及以上设备，其相间绝缘的额定操作冲击耐受电压为相对地额定操作冲击耐受电压乘以 1.5 计算选定。

（3）开关设备纵绝缘。330kV 及以上开关设备纵绝缘的

额定操作冲击耐受电压为相对地额定操作冲击耐受电压加反极性的工频电压幅值。

shuidianzhan huanjing baohu

水电站环境保护 (environment protection of hydropower station) 为预防、减免、消除水电工程建设和运行对环境产生的不利影响而采取的措施。根据影响要素的不同，可分为自然环境保护措施和社会环境保护措施。自然环境保护措施一般包括水环境保护、陆生生态保护、水生生态保护、大气环境保护、声环境保护、固体废弃物保护、环境监测等。社会环境保护措施一般包括人群健康保护、文物古迹保护、景观保护、移民安置环境保护、环境管理等。措施的拟定应根据施工对环境及敏感目标的影响程度的不同而有所不同，应具备经济性、有效性和可操作性。

水环境保护 工程生产废水和生活污水排放采取废(污)水污染控制处理措施；水库蓄水前采取库底清理措施；水库水质保护采取控制上游污染源、库周湿地及隔离防护带建设等措施。地下工程开挖及水库蓄水影响采取封堵、疏排、及时补充水源等措施。水库下泄低温水影响采取分层取水等措施；工程兴建对下游河段的影响采取生态调度、生态流量下泄等措施。

陆生生态保护 工程涉及生态保护目标时，首选工程避让措施；工程建设征地无法避让生态保护目标时，采取生态修复、迁地保护、建立珍稀植物园、动物搜救或建立保护区等措施；库区陆地生态系统修复采取异地恢复补偿、封山育林、划定保护区等生态补偿措施；工程临时用地采取生态恢复措施；工程建设造成水土流失影响，采用工程、植物及临时等综合措施控制水土流失。工程建设造成土地次生潜育化、次生盐碱化及沼泽化影响，采取排水、控制地下水位、土壤改良等措施。

水生生态保护 水电站筑坝阻隔采取过鱼设施、鱼类增殖放流、水生生物栖息地保护等措施。高坝大库下泄低温水影响采取分层取水等措施；水库水域及下游鱼类生境及资源减少时采取生态调度、生态流量下泄等措施。

大气环境保护 施工活动产生的粉尘和废气对施工区及周边居民点、学校、医院等敏感保护对象的大气环境质量产生不利影响时，采取防尘、降尘、抑尘以及废气削减措施。

声环境保护 水电站施工工厂作业、交通运输和爆破等产生的噪声对施工场界及周边居民点、学校、医院等敏感保护对象的声环境质量产生不利影响时，从降低源强、阻断传声途径和敏感对象防护3个方面综合进行措施拟定。

固体废弃物保护 工程施工或建设征地产生的生活垃圾、建筑垃圾、弃土弃渣、受污染土壤、一般工业固体废物、不属于危险废物的废弃尾矿渣、危险废物等按照固体废弃物性质鉴别后，分类采取无害化、减量化及资源化利用等处理措施。处理时应避免产生二次污染。

环境监测 见水电站环境监测。

人群健康保护 工程施工建设及水库运行引起的介水传染病、虫媒传染病、自然疫源性疾病及地方病等的爆发和流行，针对施工区、库区及移民安置区采取卫生清理、疫源清除、卫生防疫、库底清理及消毒、管理及监测等措施。(见人群健康保护)

文物古迹保护 根据文物保护专业单位的调查成果，按照文物主管部门的要求，有针对性地对受影响的文物采取原址保护、重建、修缮、迁移、拆除、复制、拍摄及拓印等措施。

景观保护 根据自然景观价值、工程影响程度的不同，采取避让、防护、恢复等措施。景观的恢复应体现整体性、环境美学、自然价值等原则。

移民安置环境保护 结合移民安置规划，对在移民安置过程中产生的不利环境影响，根据具体影响的程度制订相应的保护措施，如生态保护、人群健康、污水处理、固体废弃物处理、水土流失治理、声环境保护等。对于单独立项的专项设施、改复建项目应单独进行环境影响评价及环境保护工作。

环境管理 见水电站环境管理。

shuidianzhan huanjing guanli

水电站环境管理 (environmental management of hydropower station) 运用行政、法律、经济、教育和科学技术手段，协调和处理水电站建设及运行与环境保护之间的关系，防治水电站建设产生环境污染和生态破坏。水电站环境管理是水电站建设和运行管理的重要组成部分，是水电站环境保护"三同时"(同时设计、同时施工、同时投产使用)制度有效落实的重要手段。水电站环境管理可以保证各项环境保护措施的顺利实施，使工程的兴建对环境的不利影响得以减缓和避免，维护区域生态的稳定，促进电站建设区域社会经济与环境协调发展。

管理内容 包括：①组织开展水电工程环境影响评价，水土保持方案编制，环境保护和水土保持设计、验收和后评价工作；②保证各项环境保护措施按照环境影响报告书及其批复、环境保护设计的要求实施，使各项环境保护设施正常、有效运行；③预防污染事故的发生，保证各类污染物达标排放或合理回收利用，使工程区及其附近的水环境、环境空气和声环境质量达到环境质量要求的标准；④水土流失和生态破坏得到有效控制，并通过采取措施恢复原有的水土保持功能和生态环境质量；⑤做好施工区卫生防疫工作，完善疫情管理体系，控制施工人群传染病发病率，避免传染病爆发和蔓延；⑥理清工程建设废弃物，做好工程建设区绿化美化工作，保障工程建设的顺利进行，生产生活环境清洁美观。

管理体系 分为外部环境管理和内部环境管理两部分。

外部环境管理 国家及地方环境保护行政主管部门依据国家相关法律、法规和政策，按照工程需达到的环境标准与要求，依法对水电工程建设各阶段进行不定期监督、检查及环境保护竣工验收等活动。

内部环境管理 建设单位执行国家和地方有关环境保护的法律、法规、政策，贯彻环境保护标准，落实环境保护措施，并对工程的过程和活动按环境保护要求进行管理。

水电站环境管理正从单个电站的环境管理向流域梯级环境管理发展，统一开展流域梯级电站生态环境保护工作。

shuidianzhan huanjing jiance

水电站环境监测 （environmental monitoring of hydropower station） 水电站建设前、建设期和运行期针对环境质量及环境影响因子变化情况所开展的检测、观测和调查工作。水电站的环境监测任务视其工程特性及其可能造成的环境影响而定，在工程环境影响评价的基础上提出。

环境监测地点（或称断面）的布置、监测频次、监测项目、监测方法等要符合专业技术规范和标准规定要求，要能如实反映水电站建设前、建设期和运行期的环境质量情况。

在水电站建设前进行环境现状实测，以作为水电站建设后环境状况变化对比的背景值。水电站建设期进行施工环境影响监测，并提前建设完成运行期需要的环境监测设施。工程竣工投产后，环境监测是水电站管理工作的组成部分。

在水电站建设前环境影响评价阶段，要全面搜集工程影响地区的环境状况资料。在搜集已有的监测成果的基础上根据环境影响评价要求进行补充监测，主要监测的环境因子有噪声、大气粉尘、水质、土壤等。

水电站建设期的环境监测应针对施工中可能影响的环境因子，如噪声、大气粉尘、水质、水土流失等进行。建设期环境监测的主要任务是监测施工中的污染情况，检验施工期环境保护措施实施效果。

水电站运行期监测应针对电站水库蓄水及运行发电后可能影响的环境因子，如水质、水温、气体过饱和、局地气候、生物多样性、生境条件等进行。运行期监测的主要任务是监测电站运行是否符合原设计或环境保护设计要求，水电站对环境的不利影响是否与预测相符，验证环境保护措施是否达到预期目标。根据监测资料确定是否需要改变运行方式，对环境保护设施或其他对策措施改进或调整，研究在确保环境保护目标的前提下，提高电站经济效益或进一步牺牲部分电站效益，以减轻或消除对环境的不利影响，为后续评估提供依据。水电站对环境有利影响的监测，旨在核实设计的工程环境效益，并进一步促进开发利用，以弥补水电站水库淹没造成的损失，并为库周生态环境向良性循环发展提供依据。

shuidianzhan huanjing jianli

水电站环境监理 （environmental supervision of hydropower station） 环境保护监理单位受建设单位委托，遵照国家和地方环境保护的法律、法规，依据批复的环境影响评价、水土保持方案和设计文件、施工承包合同中的环境保护条款等，对水电建设过程中的环境保护实施监督管理的行为。在不同施工阶段，水电站环境保护监理体现不同的工作内容，大体可分为筹建期环境监理、施工期环境监理和试运行期环境监理。

筹建期环境监理 工程筹建阶段，工程以“三通一平”（水通、电通、路通、场地平整）建设内容为主，环境保护监理单位重点工作内容包括：

（1）编写环境保护监理实施细则。

（2）建立环境保护和水土保持管理体系，制定管理办法，明确管理职责。

（3）协助业主开展设计管理工作，完善工程环境保护与水土保持设计文件。

（4）开展部分专项环境保护设施的建设监理，确保“三同时”（同时设计、同时施工、同时投产使用）制度的落实。

施工期环境监理 主体工程施工阶段是工程全面建设的阶段，环境保护专项设施大部分已进入运行阶段，该阶段环境监理的主要内容包括：

（1）参与施工招投标设计、实施方案设计等文件的审查，重点审查环境保护相关内容。

（2）审查施工组织设计中环境保护措施或环境保护工程的施工工艺、材料以及施工进度安排等内容。

（3）监督检查施工过程中设计文件、合同条款里的环境保护措施及对策落实情况（检查施工现场生活污水、生活垃圾处置情况，施工噪声控制情况，人群健康保护情况，大气环境保护措施、水土保持措施等落实情况）。

（4）对监测工作进行监理和管理，通过分析监测成果，检查环境保护措施实施效果，评价是否满足相关要求。

（5）参与调查处理施工期环境污染事故或环境污染纠纷。

（6）参与合同项目完工验收。

试运行期环境监理 该阶段土建施工高峰已过，是工程的收尾阶段。该阶段环境监理的主要工作，在延续施工期监理内容的基础上，增加了部分内容：

（1）组织承包商编制完工、竣工文件，按要求向环境监理单位提交，在审查施工初验报告和联合检查后，会同业主相关管理部门，组织召开初验会议，形成初验意见，明确后续工作内容和相关要求。

（2）配合收集和准备环境保护行政主管部门所需的资料，协助业主组织竣工验收。

（3）编制环境监理总结报告，同时归档环境监理资料。

shuidianzhan huanjing yingxiang pingjia

水电站环境影响评价 （environmental impact assessment of hydropower station） 对水电站建设和运行过程中可能造成的环境影响进行预测、分析和评估，提出预防或者减轻不利环境影响的对策和措施，并提出跟踪监测的方法与制度。水电站环境影响评价是水电工程可行性研究设计阶段的重要组成部分，提出了工程建设的环境可行性。

评价目的 使有利影响得到合理利用，不利影响得到减轻或消除，从环境保护的角度为论证工程方案或建设项目的可行性提供依据。它是一项多学科、跨部门、综合性强的工作。

评价内容 一般包括工程概况，工程分析，环境状况调查与分析，环境影响识别、预测和评价，对不利影响提出对策措施，环境管理和监测计划，环境保护投资及经济损益分析，公众参与，环境影响评价结论。

工程概况 主要包括河流（河段）规划概况、规划环评结论、工程所处地理位置、工程的规模和特性、电站运行调度方式、工程主要建筑物、工程施工布置、水库淹没范围和主要实物指标、移民安置规划、工程投资。

工程分析 论述工程产业政策的符合性，评价区相关规划的协调性，工程料场、渣场和施工场地环境的合理性，工程“三废”（废水、废气、固体废弃物）和噪声主要排放源与排放强度，工程占地，工程类型和规模，工程运行方式。

工程分析时段分为施工期和运营期。

环境状况调查与分析　主要对与工程有关的气象、水文、泥沙、水温、水质、地形、地质、土壤、水土保持、陆生生物、水生生物，以及人口、土地、工业、农业、矿产、人群健康、风景名胜、文物古迹、污染源等状况进行调查，并对其与工程的关系进行分析，同时提出评价区存在的主要环境问题。

环境影响识别、预测和评价　在环境现状调查与分析的基础上，根据工程特性和地区环境特点选择有关的环境因子进行识别，从中选出主要的环境因子，对其受工程影响后的变化趋势进行预测，在此基础上对其有利和不利影响的程度做出评价。

对不利影响提出对策措施　主要针对工程造成的不利影响采取避让、减缓、补偿、恢复或其他保护措施，达到减轻或消除的目的。

环境管理及监测计划　提出环境管理和环境监理目标、管理体系、管理内容和管理计划。环境管理分为施工期环境管理、运行期环境管理和移民安置区环境管理。制定各环境要素的监测目的、指标、监测点位布设、监测内容和监测时间。

环境保护投资及经济损益分析　对水电工程环境保护措施进行费用概算，并对水电工程造成的环境损失和水电工程改善环境得到的环境效益进行对比分析。造成的环境损失主要包括减免环境影响措施的费用和无法采取措施引起的环境资源损失。

公众参与　通过信息公开、问卷调查、听证会、论证会等方式，收集受影响单位、个人、社会团体或对本工程关心的其他团体和个人对本工程环境影响及环境保护措施的意见和建议。

环境影响评价结论　主要在预测评价的基础上，说明工程的主要有利和不利影响、对策措施的效果及环境影响经济损益分析的结论意见，明确从环境保护的角度分析工程建设的可行性。

环境影响评价一般分为3个阶段。第一阶段为准备阶段，主要收集有关资料和文件，进行初步的工程分析和环境现状调查，筛选评价项目，确定各单项环境影响评价的工作等级，编制工作大纲。第二阶段为评价工作阶段，作进一步的工程分析和环境状况调查以及必要的测试，识别工程的主要环境因子，对主要的环境因子进行预测和评价，对不利影响提出对策措施。第三阶段为报告书编写及审批阶段，按照有关规定汇总、分析评价工作各阶段的资料和数据，提出结论意见，完成报告书的编制并上报审批。

shuidianzhan jisuanji jiankong xitong

水电站计算机监控系统　(computer supervisory control system of hydropower station)　以计算机为核心构成的对水电站生产过程进行自动监测、控制的系统。与其他类型电站的计算机监控系统相比，水电站计算机监控系统的特点是：①水电站的各机组共用大坝和水库，互相之间存在制约，不同的开机组合和负荷分配直接影响总耗水量，从而影响经济效益。监控系统通过自动发电控制(automatic generation control，AGC)，可以使机组的综合效率最优，实现节水多发。②监控系统在对机组进行控制时，要计及防洪、灌溉、航运、供水等制约条件。③闭环调节主要由专门装置（调速器和励磁调节器）实现，监控系统较少承担闭环调节任务。④机组起停灵活、调节迅速，适于承担调峰和调频任务。水电站计算机监控系统在执行上述任务时，要考虑躲开空蚀区、振动区及避免频繁起停机。⑤水力机械系统更易于实现机组起停和监控的完全自动化，为“无人值班”（少人值守）和完全无人值班创造条件。

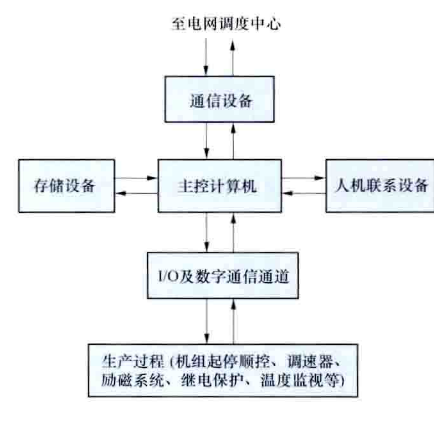


图1　水电站计算机监控系统原理框图（集中式）

原理框图　见图1和图2。

功能　一般有所列功能的部分或全部：数据采集、数据处理、控制与调节、数据通信、时钟同步、运行管理与指导、人机联系、培训仿真、系统维护及软件开发等。

结构模式　通常有集中式与分层分布式两种模式。

集中式结构　用于机组台数少、容量小的小型水电站，设置一台主控计算机，配备有人机联系和对外通信联系等设备，见图1。电站生产过程运行参数和设备运行状态等数据，直接由主控机通过开关量和模拟量输入通道采集，控制调节命令由主控机发出，经输出通道直接作用到水轮发电机组等设备的执行机构。系统的全部功能由主控计算机集中实现。

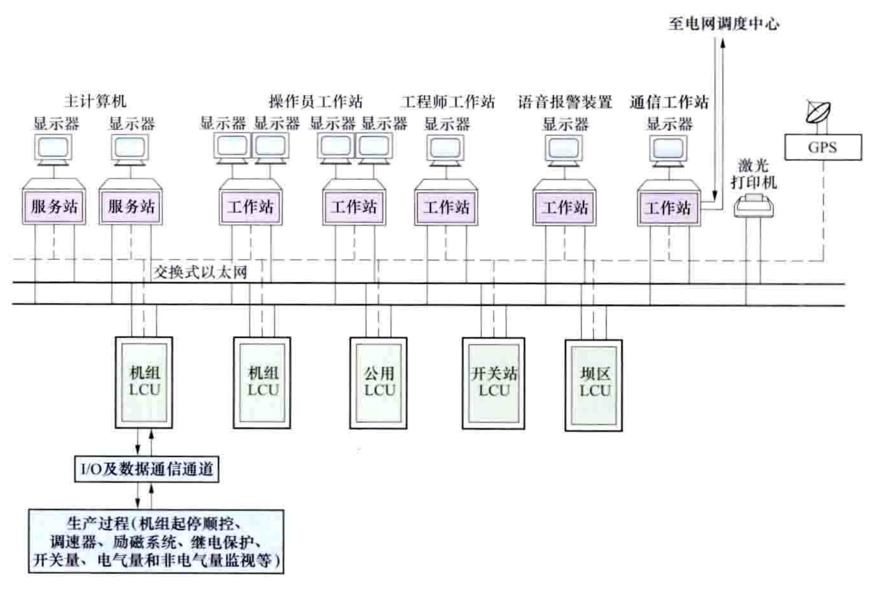


图2　水电站计算机监控系统原理框图（分层分布式）

分层分布式结构　用于规模大、机组台数多的大中型水电站，见图2。系统分为电站控制级和现地控制级两部分。电站控制级设有多台操作控制计算机，配备完善的人机联系设备，

实现对全电站运行状况的监视、发布控制调节命令和对外通信等。现地控制级直接联系生产设备，负责采集与处理现场数据、执行控制调节命令等，通常根据被控制对象的规模和地理位置来设置，具有较强的独立工作能力。各水轮发电机组分设现地控制单元，另外设开关站现地控制单元、公用设备现地控制单元和坝区设备现地控制单元等。

电站控制级与现地控制级之间的通信联系，多采用交换式以太网实现，常用的有星形和环形两种结构形式，见图3和图4。有的水电站的网络分为两层或多层，信息网采用星形结构，控制网采用星形或环形结构。

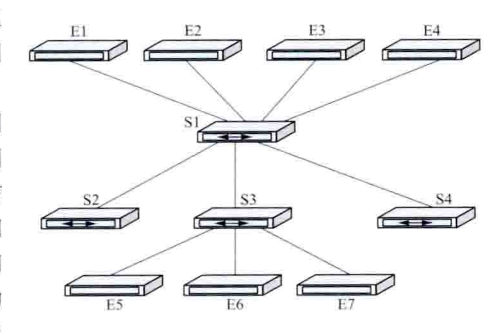


图3　分层分布式监控系统（星形）框图
S1—电站级交换机；S2、S3、S4—LCU交换机；E1、E2、E3、E4—电站级设备（各类工作站等）；E5、E6、E7—LCU的控制器、I/O模块、交流采样、触摸屏等（其他交换机所连接设备未示出）

硬件配置　根据电站的装机容量及电站在系统中的重要性等综合因素，电站控制级设置所列设备的全部或其中一部分：网络通信设备和通信介质、主计算机（数据服务器）、操作员工作站、工程师工作站、通信工作站、培训工作站、历史数据存储器、语音报警工作站、卫星时钟接收和授时装置、模拟屏或大屏幕、不间断电源（uninterrupted power supply，UPS）、外围设备等。

现地控制级按监控对象设置现地控制单元，以可编程控制器（programmable logic controller，PLC）或专用控制器为基础，还包括人机界面、电源模块、交流采样装置、同步装置等。

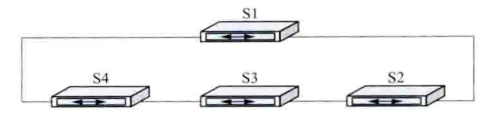


图4　分层分布式监控系统（环形）框图
S1—电站级交换机；S2、S3、S4—LCU交换机
（交换机所连接设备未示出）

软件配置　监控系统软件，是系统实现监控功能的计算机程序的集合。主要可分为计算机系统软件、支持软件和应用软件。应用软件是实现水电站生产过程监控功能的计算机程序。

工程实例　图5所示为中国三峡右岸水电站计算机监控系统总体结构。系统采用了分层分布开放式系统结构。网络结构分为4层，分别为电站管理层、电站控制层、现地控制层和信息发布层。电站控制层的主交换机端口到各现地控制层各交换机通过光纤直接连接，现地控制单元呈星形分布。

简史　世界上最早的较完整的水电站计算机监控系统于20世纪70年代出现在美国。80年代起，水电站计算机监控系统在许多国家投入使用。

图5　三峡右岸水电站计算机监控系统总体结构图

中国从20世纪60年代起就开始了水电站计算机监控技术的应用研究试点工作。随着80年代富春江水电站、葛洲坝二江水电站计算机监控系统的投入运行，中国的水电站计算机监控技术进入快速发展时期，完成了从引进吸收到自主开发的飞跃。90年代以后，新建的大中型水电站普遍采用了计算机监控系统。2007年分别投入运行的龙滩水电站和三峡右岸电站等特大型水电站都采用了国产的计算机监控系统。

shuidianzhan jidianbaohu

水电站继电保护

(relay protection of hydropower station)　检测水电站发电机、变压器等电气设备或线路不正常运行或故障情况并发出报警信号，或有选择地发出跳闸或停机指令的自动化装置。水电站继电保护的作用：①发出报警信号后，通过运行人员调整，减少机组出力或终止不正常运行情况的发展；②自动、迅速、有选择性地将故障的电气设备或线路从电力系统中切除，终止故障的发展，保证电力系统中无故障部分恢复正常运行。

电力设备和线路短路故障的保护应有主保护和后备保护。主保护是指满足电力系统稳定和设备安全技术，能以最快速度有选择地切除被保护设备和线路故障的保护。后备保护是指主保护或断路器拒动时，用以切除故障的保护。

继电保护装置的发展经历了机电型（电磁式、感应式）、整流型、晶体管型、集成电路型等模拟型、数字型（微机型）过程。微机型继电保护装置已从过去的单机单功能逐步发展到分层多微机结构的成套保护装置。它具有硬、软件结构模块化，可根据不同要求灵活配置，以及完善的自检互检和故障信息存储打印等功能，极大地方便了运行维护，在发电机，变压器及高、低压输电线上得到广泛的应用。

水电站继电保护主要包括水轮发电机保护、变压器保护、母线保护、线路保护及厂用电保护，与电力系统其他部分继电保护相比，除水轮发电机继电保护、水轮发电机-变压器组继电保护和抽水蓄能发电电动机继电保护有较大区别外，其他如线路继电保护、母线继电保护及主变压器继电保护等均相同（见《电力系统卷》线路保护、母线保护、变压器保护）。

水电站厂用电继电保护包括厂用变压器、厂用高压馈线、厂用电动机等的保护。

（1）对于厂用变压器的相间短路故障，装设电流速断保护和带时限过电流保护，容量为6.3MV·A及以上的高压厂用变压器还要装设纵联差动保护；容量在2MV·A及以上厂用变压器，当电流速断保护灵敏性不符合要求时，也应装设纵联差动保护。低压侧直接接地的厂用变压器的接地故障，需装设零序过电流接地保护。

（2）厂用高压馈线装设电流速断保护及带时限过电流保护。

（3）水电站的厂用电动机大多容量不大，以380V低压电动机为主，其保护通常随自动空气断路器配置的复式脱扣器构成，复式脱扣器中的电磁脱扣作短路保护，复式脱扣器中的热脱扣作过负荷保护。有的自动空气断路器配备了微机控制的释放机构来实现上述保护。

shuidianzhan jiedi xitong

水电站接地系统

(grounding system of hydropower station)　保证水电站电气系统正常运行，保障设备和人身安全所需的各种接地体、接地线的总称。水电站接地体包括自然接地体和人工接地体。自然接地体为埋入水中或地下的钢筋混凝土的钢筋骨架或金属结构物，人工接地体有垂直接地体、水平接地体和接地网。水电站的所有接地体相互连接成一个整体，全厂设备的接地都接在接地网上面，组成一个完整的接地系统。对地处高土壤电阻率地区的水电站，当不满足有效接地系统接地电阻要求时，要验算电站的接触电压和跨步电压水平，必要时还需采取隔离措施。

水电站接地分类　水电站接地可分为工作接地、保护接地、防雷接地和防静电接地。工作接地是水电站电气设备运行所必需的接地，如发电机中性点、变压器中性点的接地都属于这类接地。保护接地是为保护人身和设备的安全而设，水电站中所有电气设备的机座、金属外壳、金属支架、金属防护围栏以及输电线路的金属杆塔和钢筋混凝土杆塔都要接地，以防止绝缘损坏使这些部分带电而危及人身安全或损坏设备。防雷接地为泄放雷电流入地而设，是防雷的一个重要组成部分，例如避雷针（线）接地冲击电阻值过高，就会降低其保护效果，或者产生过高的反击过电压，损坏设备。防静电接地为防止静电产生火花对易燃油贮罐和管道等危险作用而设，水电站中对储油罐，输油管和易燃、易爆物体的金属外壳需进行多点接地。

接地电阻及要求　为了达到保护接地所要达到的目的，对水电站接地电阻的数值有一定要求。中国采用的工频接地电阻允许值见表1。

表1　工频接地电阻允许值

<table>
<tr><th colspan="2">系统名称</th><th>一般土壤电阻率地区接地电阻要求值（Ω）</th><th>高土壤电阻率地区接地电阻要求值（Ω）</th></tr>
<tr><td colspan="2">有效接地系统</td><td>$R\leqslant\frac{2000}{I}$</td><td>$R\leqslant\frac{5000}{I}$；还应满足接触和跨步电位差；应采取电位隔离措施</td></tr>
<tr><td rowspan="2">非有效接地系统</td><td>仅用于高压电力设备的接地装置</td><td>$R\leqslant\frac{2000}{I}\leqslant 10$</td><td>—</td></tr>
<tr><td>高压与低压电力设备共用的接地装置</td><td>$R\leqslant\frac{2000}{I}\leqslant 4$</td><td>$R\leqslant 15$</td></tr>
<tr><td colspan="2">低压电力设备</td><td>$R\leqslant 4$</td><td>—</td></tr>
</table>

注：I为计算用的流经接地装置的入地短路电流，A。

冲击接地电阻允许值没有规定，但接入主接地网的避雷针（线）和避雷器应在与主网连接处埋设集中接地装置，独立避雷针（线）应校核与设备的空间距离和与设备接地体的地中距离。

土壤和水的电阻率　水电站大都处于山区，岩石的电阻率一般很高，接地电阻值要达到要求往往有一定困难，所以首先要充分利用水电站的各种自然接地体，利用水作为散流介质，往往可达到事半功倍的效果。中国使用的土壤和水的电阻率参考值见表2。

表 2　土壤和水的电阻率参考值（Ω·m）

类别	名称	电阻率近似值	不同情况下电阻率的变化范围		
			较湿时（一般地区、多雨区）	较干时（少雨区、沙漠区）	地下水含盐碱时
土	陶黏土	10	5～20	10～100	3～10
	泥炭、泥灰岩、沼泽地	20	10～30	50～300	3～30
	捣碎的木炭	40	—	—	—
	黑土、园田土、陶土	50	30～100	50～300	10～30
	白垩土、黏土	60	30～100	50～300	10～30
	砂质黏土	100	30～300	80～1000	10～80
	黄土	200	100～200	250	30
	含砂黏土、砂土	300	100～1000	1000 以上	30～100
	河滩中的砂	—	300	—	—
	煤	—	350	—	—
	多石土壤	400	—	—	—
	上层红色风化黏土、下层红色页岩	500（湿度 30%）	—	—	—
	表层土夹石、下层砾石	600（湿度 15%）	—	—	—
砂	砂、砂砾	1000	250～1000	1000～2500	—
	砂层深度大于10m、地下水较深的草原、地面黏土深度不大于 1.5m、底层多岩石	1000	—	—	—
岩石	砾石、碎石	5000	—	—	—
	多岩山地	5000	—	—	—
	花岗岩	200 000	—	—	—
混凝土	在水中	40～55	—	—	—
	在湿土中	100～200	—	—	—
	在干土中	500～1300	—	—	—
	在干燥的大气中	12 000～18 000	—	—	—
矿	金属矿石	0.01～1	—	—	—

降低接地电阻的措施　在高土壤电阻率地区，经技术和经济比较，可采取的降低接地电阻的措施有：①当在发电厂、变电站 2000m 以内有较低电阻率的土壤时，可敷设引外接地；②当地下较深处的土壤电阻率较低时，可采用井式或深钻式接地；③在接地体周围填充电阻率较低的物质或降阻剂，但需注意该种方式应长效、稳定、对环境无强烈的腐蚀作用；④敷设人工水下接地网，并有可靠的防止水流冲毁的措施。

接触电压和跨步电压　电气设备故障接地时，接地短路电流经接地体向地中扩散，大地表面形成电位分布。沿设备外壳、围栏或架构距地面高度为 h（h 一般取 1.8m）的 A 点，以及距设备、围栏或架构水平距离为 d（d 一般取 0.8m）的 B 点之间的电位差称接触电位差，见图 1（a）；人体接触该两点时所承受的电压，称为接触电压。在上述电气设备故障接地，大地表面形成电位分布的情况下，地面上水平距离为跨步（水平距离 d）的两点之间的电位差称跨步电位差，见图 1（b）；人体两脚接触该两点时所承受的电压，称为跨步电压。

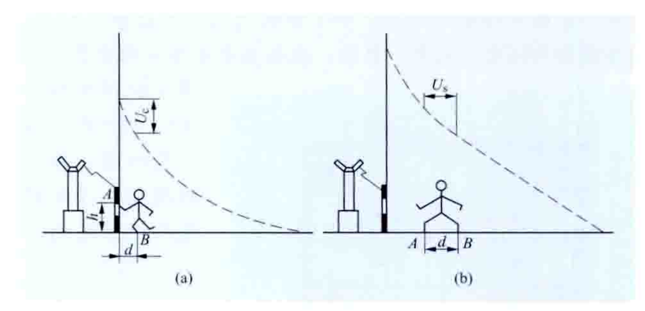


图 1　接触电位差和跨步电位差示意图
（a）接触电位差；（b）跨步电位差

接触、跨步电位差允许值　接触电位差和跨步电位差的允许值，对有效接地系统分别为

$$U_t=\frac{174+0.17\rho_f}{\sqrt{t}} \tag{1}$$

$$U_s=\frac{174+0.7\rho_f}{\sqrt{t}} \tag{2}$$

对非有效接地系统分别为

$$U_t=50+0.05\rho_f \tag{3}$$

$$U_s=50+0.2\rho_f \tag{4}$$

式中 U_t、U_s 分别为接触电位差和跨步电位差，V；ρ_f 为人脚站立处地表面的土壤电阻率，Ω·m；t 为接地短路（故障）电流的持续时间，s。

均衡电位接地和高电阻率材料覆盖地面　为降低接触电位差和跨步电位差，水电站采取均压接地网、均压接地带等均衡电位接地措施。在没有布置设备的地方，也可采用高电阻率材料覆盖地面的措施，如碎石层或沥青地面。

（1）均压接地网。由于接地网上的电位均相同，平行均压带间的电位分布曲线陡度比单独接地体的小，因而接触电位差和跨步电位差都减小，起到均压作用。网内的均压带间的间距，有均匀布置和不均匀布置两种（见图 2），不均匀布置的网孔电位差较均匀。

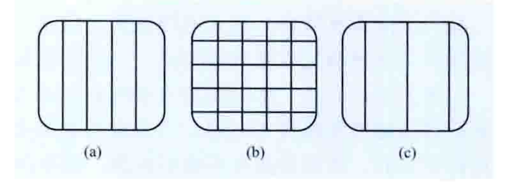


图 2　均压接地网类型示意图
（a）等间距长孔接地网；（b）等间距方孔接地网；（c）不等间距长孔均压网

（2）均压接地带。对于跨步电位差很高的地方，也可设均压接地带。例如，高压开关站的入口有人通行，可平行于接地网边敷设帽檐式水平接地带，其埋深从网边开始逐步加深（见图 3）。图中示例，当埋深为 1.3、2.0m 时，可使跨步电位差降低约 40%；

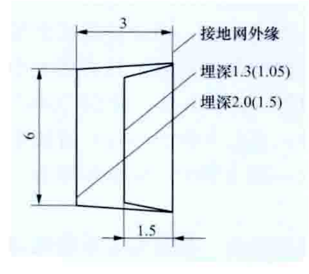


图 3　帽檐式均压带布置示意图（单位：m）

当埋深为1.05、1.5m时，跨步电位差可降低约20%。

（3）铺盖高电阻率材料路面。均压接地网内接触电位差最大的地方，在边角孔（见图4中4），接地网和网孔中心点的电位差即为接触电位差。为了降低边角孔的接触电位差，可加附加均压带（见图4中1），或用高电阻率材料覆盖（见图4中斜平行线区）。最大跨步电位差出现在接地网四角，且距接地网外缘距离为$(h_p-0.4)$ m和$(h_p+0.4)$ m的两点间（h_p为接地地网埋深）。这些地方如果没有布置设备但有人行走，就可以敷设高电阻率的地面层，避免产生危险的接触电压。

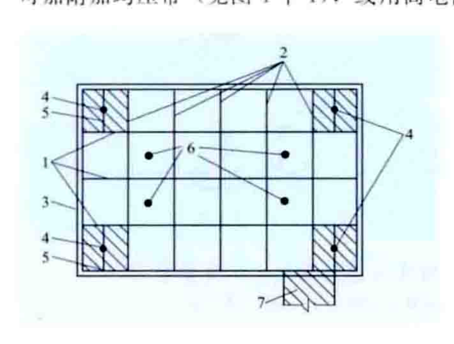


图4　均压网设计示例

1—均压带；2—加强均压网电路连接的接地带；3—砖石围墙；4—最大（边角孔）接触电位差计算点；5—降低最大接触电位差的附加均压带；6—一次边角孔接触电位差计算点；7—出入口交通道路

shuidianzhan jieru xitong

水电站接入系统　（power connection system of hydropower station）　对水电站一次部分的接入电力系统方式、送电方向、出线电压和出线回路数等进行电气计算、分析和选定，并对二次部分提出方案的总称。水电站接入系统设计水平年，一般取水电站第一台机组投产后5～10年。接入系统方案与设计水平年电力系统发展规划，输电系统规划，水电站在电力系统中的作用，水电站动能特性、装机规模及枢纽布置、地理位置，以及地形、地质条件，水力资源利用等都有密切关系，抽水蓄能电站还应考虑调峰负荷和抽水电源的合理配置。由于水电站大多地处高山狭谷、地形复杂，电站枢纽布置和出线都较困难，且远离负荷中心，一般均为远距离输电，技术问题较多。因此，要充分考虑这些特点，合理确定电站送电方向、出线电压和出线回路数。

接入系统方式　水电站接入系统的方式大致有：①长距离超高压输电线路接入电网。当大型水电站或水电站群远离负荷中心时，常采用超高压输电线路，经中间开关站或变电站，将电能送至电网负荷中心。②中、短距离高压输电线路辐射式接入电网。当水电站离负荷中心不远，且电网网络结构已基本形成时，一般以辐射式接入电网的枢纽变电站，抽水蓄能电站尤为多用。③梯级水电站常以较低电压输电线路接入梯级中的中心水电站，集中升压后，再接入电网。④大型梯级电站或邻近电站打捆接入外送平台，通过特高压交流或直流送出。⑤作为不同电网之间的联络枢纽，只有特大型水电站才有这种情况，例如中国三峡水电站，除以500kV输电线路接入华中、华东电网外，还设3回±500kV直流输电线路分别送江苏、上海和广东，成为华中、华东和华南三大电网之间的联络枢纽。

送电方向、出线电压和出线回路数　根据电力系统规划设计的负荷发展及分析资料、水电站的出力指标等，通过分区电力电量平衡计算出水电站出力、系统调峰需要和备用要求等，确定水电站的送电方向、出线电压和出线回路数等。

水电站与电力系统连接的出线电压等级一般采用一级，不超过两级。抽水蓄能电站的出线电压等级一般采用一级。在满足电站送电容量的前提下，尽量减少出线回路数。根据输送容量和输电距离的远近，采用不同的输电电压。各级电压线路的输送容量和输电距离见下表。

各级电压线路的输送容量和输电距离

额定电压（kV）	输送容量（MW）	输电距离（km）
35	2～15	20～50
66	3.5～30	30～100
110	10～50	50～150
220	100～500	100～300
330	200～800	200～600
500	1000～1500	150～800
750	2000～2500	500以上

电气计算和分析　根据对水电站丰水年、枯水年不同代表日的典型运行方式分析，以及水电站保证出力、预想出力、强迫出力等出力指标，进行电气计算和分析，并对下列电气设备提出要求：①水轮发电机是否调相或进相运行；②发电机的励磁方式及强励倍数、功率因数、暂态电抗等；③抽水蓄能机组各种工况及工况转换时间要求等；④变压器分接头及调压范围，容量（联络变压器）、阻抗值和中性点接地方式等；⑤是否装设并联电抗器。

接入系统的二次部分　包括继电保护、安全稳定控制装置、调度自动化、电能量计量、报价系统、调度数据接入与安全防护以及系统通信等：①继电保护的接入系统包括线路保护、自动重合闸、母线保护、断路器失灵保护、线路过电压保护、故障录波与测距方案，继电保护及故障录波信息管理系统的电厂子站的配置。②电力系统安全稳定控制包括电厂安全稳定控制装置和相角测量装置的配置方案。③调度自动化包括电网对电站的调度方式，通信通道、通信规约、通信速率或带宽，以及遥测、遥信、遥控、遥调信息的内容；水调自动化的通信通道、通信规约、通信速率或带宽，以及传送信息的内容。④电能量计量的接入系统包括计费关口点和考核关口点的设置，向调度端传送电能量计量信息的内容。⑤报价系统的接入系统包括配置方案、技术要求、通信通道和通信规约。⑥调度数据接入与安全防护的接入系统包括接入调度数据网的方案、网络接入节点、通道和带宽，电厂接入电力调度数据网的安全防护方案和电厂内部各二次系统的互联安全防护方案。⑦系统通信的接入系统包括至少两个系统通信方案及比较后的推荐方案。光缆通信方案包括光缆敷设方式、光缆形式、路由及容量，载波通信方案包括载波路数、耦合方式及耦合相。此外，还包括系统通信、调度自动化、继电保护等的通道组织，电厂调度程控交换机的配置及接入方案，综合数据通信网的接入方案等。

shuidianzhan jinshuikou

水电站进水口　（intake of hydropower station）　水轮发电机组从水库或河流中取水的水工建筑物。由进水口

通道和上部结构组成。抽水蓄能电站具有抽水和发电两种运行工况，水流呈双向流动，对上水库，发电时为进水口，抽水时为出水口；对下水库，发电时为出水口，抽水时为进水口，分别简称上、下水库进（出）水口。进水口通道包括进口段、闸门段和渐变段。为了防止污物进入水轮机，在进口段的前缘设有拦污栅。进水口闸门按工作性质可分为工作闸门、事故闸门和检修闸门。进水口上部结构设有工作平台、启闭机和清污设备。进水口的布置应考虑防泥沙、防污物、防冰冻（简称“三防”），同时还要保证进水畅通和流态平稳。

类型　水电站进水口按水流条件不同，可分为开敞式进水口，有压式进水口和抽水蓄能电站上、下水库进（出）水口3种基本形式。

开敞式进水口　又称无压进水口，进水口流道有自由水面，且水面以上净空与外界空气保持贯通。

有压式进水口　流道均淹没于水中，并始终保持满流状态，具有一定的压力水头。按照进水口的位置、闸门槽和引水管道的布置，又可分为坝式进水口、河床式进水口、岸塔式进水口、竖井式进水口、岸坡式进水口、塔式进水口和水库分层取水进水口7种。其中，布置在混凝土坝或压力前池上的水电站进水口称为坝式进水口；作为河床式水电站挡水建筑物的一部分，与电站厂房连为整体的进水口称为河床式进水口；背靠岸坡布置，闸门设在塔形结构中，可兼做岸坡支挡结构的进水口称为岸塔式进水口（见图）；闸门井布置于山体竖井中，入口与闸门井之间的流道为隧洞段的进水口称为竖井式进水口；闸门门槽（含拦污栅槽）贴靠倾斜岸坡布置的进水口称为岸坡式进水口；在大坝或库岸以外独立布置的进水口称为塔式进水口；为获取不同水库水温而设置的进水口称为水库分层取水进水口。



岸塔式进水口

抽水蓄能电站上、下水库进（出）水口　按输水建筑物与水库的连接方式，可分为侧式进（出）水口和竖井式进（出）水口两种，其中呈水平向与水库连接的称为侧式进（出）水口，用竖井与水库连接的称为竖井式进（出）水口。

进水口布置　包括平面位置选择、高程确定和孔口尺寸确定等方面。进水口应选择在地形、地质条件良好的区域，避免高边坡开挖。进水口的平面位置应能直接取水或通过引渠取水，并应结合引水管道和发电厂房位置综合考虑。应尽可能布置于河流凹岸或靠近主流部位，不宜布置于含有大量推移质的支流或山沟的汇口附近。进水口前方的流态应平稳、顺畅，没有回流和漩涡发生，应避开容易积聚污物的回流区，并应避免将漂浮物带向进水口前。进水口的高程和孔口尺寸，应保证在最低运行水位时能引入发电所需的足够流量，有压式进水口应保证在上游最低运行水位以下有足够的淹没深度，使引水发电时孔口不出现贯通式漏斗漩涡而吸入空气，防止管道内的水流呈半明半暗状流态，引起管道的振动和噪声，保证压力管道和水轮机的稳定运行。设计孔口淹没深度时，可用经验公式估算，对大型水电站，一般还要通过水工水力学模型试验验证。进水口的底板高程还应结合防沙、排沙设施确定。进水口过流通道应具有流线型的轮廓体型，顺水流方向的断面尺寸应呈连续曲线逐渐收缩，使沿程压力分布均匀，流速变化连续，无脱壁和涡流现象发生，使进入管道水流平稳，水头损失最小。抽水蓄能电站上、下水库进（出）水口出流时附近库内应无有害回流和环流出现，水面波动小。

进水口“三防”　包括泥沙防治、污物防治和冰冻防治3个方面。

开敞式进水口用于低坝小库、没有调节库容、运行水位变幅不大的径流引水式水电站，进水口底坎高出河底不多。河面污物、流冰和河底的泥沙容易堵塞或淤积进水口，甚至进入引水道和水轮机，往往对水电站安全运行造成危害，轻则增加过栅水头损失，减少引用流量，磨损水轮机，降低机组出力；重则堵塞进口或将拦污栅压垮，大量污物涌入水轮机，造成机组停机事故。重视开敞式进水口的“三防”问题非常重要。

有压式进水口多用于有调节库容、运行水位变幅大的水电站。进水口有一定淹没深度，一般情况下漂浮物和流冰不易堵塞进水口。进水口的底板一般都高于河床。在多沙河流上的水库，为保证不受泥沙淤积影响，多在靠近并低于进水口处设置排沙设施。如在坝式进水口设置排沙底孔或泄洪排沙闸。在塔式进水口旁侧设置排沙洞等，可以做到定期拉沙，在进水口前形成冲沙漏斗，以达到“门前清”的目的。

抽水蓄能电站上、下水库库容小，运行水位变幅大，为了减小死库容，进（出）水口底板高程一般低于河床，需在进（出）水口前缘设置拦渣设施。在含沙河川或溪流上修建上、下水库时，应因地制宜采取防沙拦沙处理措施，如在上游建拦沙潜坝、采用岸边库等措施限制进（出）水口泥沙淤积高程和过机含沙量。

泥沙防治　根据水流中推移质和悬移质的含量、粒径、级配、硬度、容重以及泥沙运动规律和淤积形态，可采取的措施有：①设置冲沙闸，将泥沙导离进水口；②设置拦沙坎，将推移质拦截在进水口前，排至下游河道；③设置排沙孔（含排沙廊道、排沙洞），将淤积到进水口前的泥沙排向下游；④设置沉沙池，将随着水流越过进水口的悬移质泥沙沉淀下来，再由排沙设施排入河道。

污物防治　根据河流中污物的来源、种类、数量和漂移特征，可采取的措施有：①在进水口拦污栅前设置拦污漂，然后将拦挡的漂浮物予以清除；②在进水口设置拦污栅，并采取门前捞漂、机械清污或提栅清污等防污措施，及时将污物清除并运走。

冰冻防治　根据河流流冰、封冻和解冻规律，以及运动特征、冰盖的厚度等，采取的措施有：①在进水口的水域拦

截流冰，将其导离进水口排至下游；②采取人工或机械措施减轻或消除流冰对进水口的冲击压力；③在进水口前采用风动或电热金属结构元件使进水口前不结冰，以减轻或消除流冰的冲击力和静冰压力；④加固建筑物结构，使其足以抵抗冰压力；⑤定期启闭闸门。

shuidianzhan jingji pingjia

水电站经济评价 （economic evaluation of hydropower station） 应用工程经济学理论，结合水电站特点分析论证水电站经济性和财务可行性的原则和方法。建设项目经济评价是项目前期工作的重要内容，是评价项目建设必要性和可能性的主要手段。水电建设项目经济评价的目的是：根据国民经济发展战略和电力发展规划的要求，在工程技术可行的基础上，计算水电建设项目投入的费用和产出的效益，为项目的科学决策提供依据。

组成 包括国民经济评价（也称经济分析）和财务评价（也称财务分析）。

（1）国民经济评价。在合理配置社会资源的前提下，从国民经济整体利益的角度出发，计算项目对国民经济的贡献，分析项目的经济效率、效果和对社会的影响，评价项目在宏观经济上的合理性。（见水电站国民经济评价）

（2）财务评价。在国家现行财税制度和价格体系的前提下，从财务主体和投资方的角度出发，计算项目范围内的财务效益和费用，编制财务报表，计算评价指标，分析项目的盈利能力和偿债能力，评价项目在财务上的可行性。（见水电站财务评价）

在水电站经济评价中，对于国民经济评价和财务评价结论都可行的建设项目，可予以通过；反之应予否定。对于国民经济评价不可行的项目，一般应予否定；对于关系公共利益、国家安全和市场不能有效配置资源的经济和社会发展项目，如果国民经济评价结论可行，但财务评价结论不可行，应重新考虑方案，必要时可提出经济优惠措施的建议，使项目具有财务生存能力。

内容 分规划评价、项目评价、水电站特征值选择、运行方案优化4类。

（1）规划评价。以国民经济评价的准则和方法，从能源开发和水资源综合利用的总体上，研究水电开发方案。规划评价常常与地区能源规划、电力系统电源规划、水资源规划结合进行。

（2）项目评价。对具体水电工程项目进行国民经济和财务分析，评价项目的经济合理性和财务可行性。

（3）水电站特征值选择。选择水电站特征值（如特征水位、装机容量、机组机型、经济管径等）。内容包括水电站投资及水电站年运行费的计算、综合利用工程费用分摊、水电站经济效益的计算和分析、对比方案的选定、方案评价及敏感性分析等。

（4）运行方案优化。优选水电站水库（群）运行调度方案，抽水蓄能电站运行方式优化等。

特点 由于水力发电开发和运行的特性，水电站经济评价在计算范围、投入和产出、水电站群分析、联网效益和费用分摊等方面具有一系列特点：

（1）计算范围大。水力发电兼有一次能源开发和二次能源转换双重性质，经济评价的计算范围应包括一次能源和二次能源系统；水电站除发电外，还有防洪、航运、灌溉、供水、养殖、旅游等效益，涉及国民经济的许多部门；库区淹没和移民涉及面也很广；水库对生态环境会产生有利和不利的影响等。

（2）投入和产出时间长。水电站建设及服务期较长。建设期，中型电站要3～5年，大型电站5～8年，特大型电站一般要8～10年或更长。服务周期，机组设备为20～30年，水工建筑物可达100年。

（3）水电站群整体分析。对水电站进行梯级和跨流域径流及电力补偿径流调节，可增加系统水电站群总保证出力和总发电量，在经济评价中不仅对水电站本身还应对水电站群整体进行分析。

（4）联网效益。大型水电站投入运行，可能引起大电力系统联网，往往具有“错峰”和减少系统备用容量的效益，在进行经济评价时也应计入这种效益。

（5）费用分摊。对具有综合利用效益的水电工程，应在费用分摊的基础上进行经济评价，或在评价时计入这种效益及相应费用。

简史和发展趋势 20世纪30年代，由于水电的大量建设，水能经济开始兴起。当时西方国家广泛应用考虑资金时间价值的经济分析原理和方法，如美国人E.L.格兰特（E.L.Grant）于1930年所著的《工程经济原理》。西方国家在水能经济方面，应用这种原理和方法，以净效益最大或发电成本最低的方法进行经济评价，但往往局限于单个工程的评价，以后随着系统的发展，才逐步趋于完善。苏联在30年代提出静态的不考虑资金时间价值的抵偿年限法，60年代以后，考虑时间因素，对抵偿年限法作了一些修正。中国自50年代起，沿用苏联的原则和方法，从70年代末开始，引进西方考虑时间因素的原则和方法，并结合国情，逐步加以完善。水利电力部门及时颁发了一系列规定和规范，如《电力工程经济分析暂行条例》（1982年）、《水力发电工程经济分析暂行规定》（1983年）、SD 139—1985《水利经济计算规范》。1987年9月1日和1993年4月，国家计划委员会先后发布了《建设项目经济评价方法与参数》和《建设项目经济评价方法与参数》（第二版），使各行各业建设项目经济评价工作得以规范化。原能源部水利部水利水电规划设计总院分别于1990年9月和1994年6月颁发了《水电建设项目经济评价实施细则（试行）》和《水电建设项目财务评价暂行规定（试行）》。电力部于1998年3月颁布了《抽水蓄能电站经济评价暂行办法》，该办法在国民经济评价方面，强调了设计电站与替代电站的可比性，突出了抽水蓄能电站的各种特殊效益，并要求进行系统的电源优化；在财务评价方面，提出了两部制上网电价，并按“避免成本法”测算电价，由市场的竞争电价进行设计电站的财务评价，通过在市场竞争电价下的偿债能力指标、盈利能力指标等分析，评价建设设计电站在财务上的可行性。2006年，国家发展改革委和建设部联合发布了《建设项目经济评价方法与参数》（第三版），在认真总结第二版实施经验的基础上，立足中国国情，借鉴国际上项目经济评价的研究成果，提出了一套比较完整、使用广泛、切实可行的经济评价方法与参数体系。2010年8月国家能源局发布DL/T

5441—2010《水电建设项目经济评价规范》，指导水电建设项目经济评价。

国民经济评价的发展趋势为：考虑资源的各种特性，选择水电站的替代电源方案时，应特别重视替代方案的可比性；计算的价格需要进一步推行影子价格；对水电站，包括抽水蓄能电站在电力系统中的各种经济效益需要全面、合理评价。

在财务评价方面的发展趋势为：①财务评价体系将发生变化，由根据资金的回报要求和借款的偿还要求反推电价，发展为根据发电侧电力市场的竞争电价，按发电与供电之间的市场关系，评价水电站建设项目的可行性，使新建的水电站能够在财务上切实可行，具有竞争上网的能力；②对水电站，包括抽水蓄能电站在电力系统中的各种经济效益如何转化为财务效益将作进一步研究，其容量效益要体现在容量价格中，常规水电站的调峰及抽水蓄能电站的调峰、填谷效益，以及备用、调频、调相、快速爬坡、提高系统可靠性的动态效益等都需要在财务评价中进行研究；③在电价上要出台容量、电量两部制电价，并体现峰谷分时电价和丰枯电价等；④财务评价的一些参数将随着国家金融、财税政策的变化，随时进行调整；⑤进一步开展水电站的综合利用投资分摊、梯级“龙头”水库电站对下游梯级水电站补偿效益的分配、水电站各种税赋等政策研究；⑥随着各种水电开发公司和流域水电滚动开发公司的发展，水电站及发电企业产权产生多元化，其财务评价内容将更加广泛，有的是对单个水电建设项目进行财务评价，有的可能是对河流梯级或整个发电企业进行财务评价；⑦随着中国水电开发向西部转移，水电开发要考虑国家能源安全和边疆稳定等问题，因而研究西部水电在全国范围内合理分配到消纳的财务政策。

参考书目

国家发展改革委，建设部．建设项目经济评价方法与参数．3版．北京：中国计划出版社，2006.

shuidianzhan jingji yunxing

水电站经济运行

(economical operation of hydropower station)　在水电站全厂出力满足电网调度给定计划值的前提下，使水电站耗水量和附加费用最少的运行方式。它是通过水电站的水轮发电机组最优组合和机组之间发电功率最优分配实现的。水电站经济运行的核心是优化数学模型及其实时应用软件，并通过水电站计算机监控系统实现。水电站经济运行的依据有电力系统调度的发电要求，以及水电站和机组各种参数的实时检测。这些参数包括上、下游水位，发电用水流量，发电机功率，电压，电流，功率因数等。对于流量的实时测量，中国仅在少数机组上做实时测量试验，未在水电站普遍应用，故常用定期率定的机组效率特性曲线替代。其他需要的信息有各机组最大、最小功率限制，上、下游水位及其变动速率限制，各机组的空蚀振动区，开停机与空载损失，电站主接线运行方式限制，机组的运行状态，各机组运行小时数和连续停机时间等。

优化准则　在规定的总发电功率下使运行机组耗水量最小。对于总发电功率

$$P=(A_1,A_2,\cdots,A_i,\cdots,A_n)\begin{bmatrix}P_1\\P_2\\\vdots\\P_i\\\vdots\\P_n\end{bmatrix}$$

满足约束条件

$$P_{i,\min}\leqslant P_i\leqslant P_{i,\max}$$

达到优化目标

$$Q^*=\min_{P\in F}[Q(P,H)]$$

式中 P 为要求的总发电功率，MW；A_i 为第 i 台机组的运行状态常数，运行机组为 1，停运行机组为 0；P_i 为第 i 台机组的功率，MW；$P_{i,\min}$ 为第 i 台机组的功率下限，MW；$P_{i,\max}$ 为第 i 台机组的功率上限，MW；Q^* 为优化目标函数，m^3/s；$Q(P,H)$ 为总发电流量，m^3/s；H 为水头，m；F 为由约束条件构成的可行域。

数学模型　分为最优功率分配和机组优化组合下的最优功率分配两类。最优功率分配是在机组组合已确定的条件下（A_1，…，A_n 已确定）机组间发电功率分配数学模型，机组优化组合下的最优功率分配则包括机组台数和机组台号最优组合下的发电功率最优分配。多机组水电站，机组最优组合节能效益显著，因而厂内经济运行的有效模型是后者。

优化的数学模型，从初期简单的等功率分配法、运行特性图解法、等微增率法，逐步发展为计算复杂的分支界限法、方向搜索法、动态规划法。其中，分支界限法的原理是：保留运行效率高的机组，平均分配机组间功率。此法在优化过程中把机组台数、台号的组合和发电功率分配两者分割起来处理。方向搜索法是有条件地将机组工作特性分为 3 个区。运行在第一区增加机组台数使总效率降低；运行在第二区增加机组台数，总效率可能降低也可能增加；运行在第三区增加台数，使总效率增加，以此确定增减机组的方向。这种方法降低了求解维数，简化了计算，但求得的是局部最优。各种数学模型中应用较普遍的是等功率分配法、等微增率法、动态规划法等。

等功率分配法　对于同型同容量的机组，在机组组合已确定的情况下，以各机组等功率分配为最优。如果水电站机组容量不同，采用按机组容量比例分配，是这种方法的扩展。以等功率分配作为基础，对于同型号等容量的机组，可采用运行特性曲线图解法实现机组最优组合。对于机组特性和容量相同的水电站，常能达到总耗用流量最小。

等微增率法　等耗量微增率准则，用于发电厂各机组之间发电功率分配，当各机组耗量函数 $Q=f(P)$ 为凸函数时，可以使电站总耗水量为最小而负荷达到最优分配。采用此法，先检查各机组耗量函数为凸性，然后做出各种水头下的微增值 b_i，对应各机组的功率值为 P_1、P_2、P_3、…、P_n。机组发电功率分配的求优过程是使总出力 $P=\Sigma A_iP_i$，若不相等，则增加或减少 b_i 值，可以得到另一组功率值，使其相等。求优过程简单、迅速，在火力发电厂应用较多。水电站机组发电功率变动范围大，不少水轮发电机组在一部分水头和运行区域其耗量函数 $Q=f(P)$ 为凹函数，或 $db/dP\approx0$，即同一 b 值下对应多个功率值，使分配不稳定，因

此水电站应用较少。

动态规划法　动态规划是美国数学家 R. 贝尔曼（R. Bellman，1920－1984）于 20 世纪 50 年代研究多阶段决策过程提出的。其要点是“在多段决定过程中不论其过去的状态和决策如何，对前面的决策所形成的状态而言，余下的诸决策必须构成最优策略”，它已在各种领域应用。厂内经济运行，寻求最优解，应该对所有可行的机组组合和发电功率分配，逐个进行比较，求出其耗水量最低的机组组合与发电功率分配，采用枚举法逐一优选，需从数以亿计的决策中寻求。采用动态规划法原理，在每一阶段舍弃绝大多数非最优决策，余下的诸决策是构成机组最优组合和负荷分配所必需的，则可以用最少的比较次数获得同样的结果，效率最高。动态规划法可以用于机组最优组合或发电功率最优分配，也可以两者结合。此法不受水轮发电机组特性曲线形状限制，理论上严格。

厂内经济运行是静态最优化过程，把整个求优计算分解成若干部分，使其等效于一个多阶段决策过程，充分发挥动态规划求优的效率。为了直观，决策变量 d_k 设定为机组分配的功率 P_k（k 是指第 k 台机组，对应第 k 阶段）。设初始状态 S_1 为电站总出力，则

$$\begin{cases} S_1 = P \\ d_1 = P_1 \end{cases}$$

$$\begin{cases} S_2 = S_1 - d_1 \\ d_2 = P_2 \end{cases}$$

$$\begin{cases} S_3 = S_2 - d_2 \\ d_3 = P_3 \end{cases}$$

状态转移方程为

$$S_{k+1} = S_k - d_k$$

其递推关系由此得出。对于第 k 阶段允许决策的集合为

$$D_k\ (S_k) = \{d_k \mid P_{k,\min} \leqslant d_k \leqslant P_{k,\max},\ d_k \leqslant S_k\}$$

指标函数为

$$V_{k,n} = \sum_{i=k}^{n} Q_i(d_k,\ H)$$

最优指标函数为

$$f_k(S_k) = \min \sum_{i=k}^{n} q_i(d_k,\ H)$$

由此得厂内经济运行的动态规划基本方程为

$$f_k(S_k) = \min[q_k(d_k, H) + f_{k+1}(S_k - d_k)]$$
$$d_k \in D_k(S_k)$$

式中 S_k 为状态变量，下标 k 表示第 k 阶段；d_k 为决策变量，下标含义同上；P 为电站总出力，MW，P_k 为第 k 台机组的功率，MW；$P_{k,\min}$ 为该机组的功率下限，MW；$P_{k,\max}$ 为该机组的功率上限，MW；H 为水头，m；q_i（d_i，H）为在 d_i 与 H 条件下对应的耗水流量，m^3/s。其最后状态 $S_n = 0$。

发展过程　水电站厂内经济运行的发展与水电站综合自动化水平密切相关。20 世纪 50 年代开始，水电站从机组自动化逐步向全厂自动化发展，按全厂经济运行的要求，采用等功率分配法进行机组间发电功率分配，采用运行特性图解法进行机组组合，用于负荷变化频繁的大型调频水电站。美国、日本称为自动发电控制（automatic generation control，AGC），见水电站自动发电控制。80 年代开始，计算机实时监控系统在中国水电站得到普遍应用，使厂内经济运行有了良好的基础，采用科学的经济运行理论和方法，通过计算机监控系统程序逻辑，实现水电站水轮发电机组的最优组合和机组之间发电功率的最优分配，大大提高了水电站经济运行水平。

shuidianzhan menjin xitong

水电站门禁系统　（access control system of hydropower station）　对水电站主要出入口和设备室进行管制的系统。门禁系统以识别技术为核心，以计算机和通信技术为手段，将各个门禁控制点、巡更点、防盗报警点有机连接成的一个整体，通过同一个操作平台，可完成各种门禁控制、巡更管理和防盗报警的综合安防控制管理功能。

水电站厂房的入口和一些重要设备间，如中央控制室、继电保护室、计算机室、直流电源室、厂用电配电室、变压器室、通信设备室以及其他必要的房间等需要安装门禁系统。

门禁系统由硬件、软件两部分组成，包括识别卡、前端设备（读卡器、电动门锁、门磁开关、各种报警探头、开门按钮、控制设备等）、传输设备、通信服务器及相关软件等。

门禁系统按识别方式分为密码识别、卡片识别和生物识别 3 类，分别通过检验输入密码是否正确，通过读卡或读卡加密码方式来识别和通过检验人员的虹膜、指纹和面部特征来识别进出权限。最流行通用的是非接触式 IC 卡门禁系统，非接触 IC 卡由于其较高的安全性、便捷性和性价比而成为门禁系统的主流。

门禁系统按照电站人员的工作岗位进行授权。在异常情况下（如非法侵入、门超时未关等），可以通过门禁软件实现微机报警或外加语音声光报警。门禁系统与水电站工业电视系统联动，可以更加有效地对电站进行管理和控制。同时，门禁系统需与火灾报警系统联动，当发现火情时，立即解锁，便于电站人员迅速撤离。

shuidianzhan nian yunxingfei

水电站年运行费　（annual operational cost of hydropower station）　水电站为维护、管理及运行而支出的费用。又称年经营成本。（见水电站发电成本）

shuidianzhan paishui xitong

水电站排水系统　（drainage system of hydropower station）　为排出水电站内的积水和弃水，保障电站各部位正常运行环境，提供水轮机过水部分和建筑物水下部分的检修条件，由水泵、控制阀件、相应管网以及监测和自动化元件等组成的系统。水电站主厂房排水系统分为检修排水和渗漏排水两个系统。大型水电站主厂房的检修排水系统与渗漏排水系统分开设置，中小型水电站的两套排水系统可共用一套设备，但必须有防止尾水管水流倒灌进厂房内的措施。

检修排水系统　水轮机检修时排出尾水管、转轮室、蜗壳、压力管道等处在尾水位以下部位的积水和来自进口闸门、进水阀、尾水闸门等的漏水，在尾水位以上部分的积水

可通过自流方式排除。分为直接排水和间接排水两种方式。直接排水方式多采用离心泵，如图1所示。

间接排水方式是在低于尾水管底部高程处设置容积庞大的排水廊道作为集水池，机组检修时用大管径排水管先将尾水管内积水排入排水廊道，再利用水泵将水从排水廊道或集水井排出厂外，以缩短排水和检修周期。大中型水电站主要采用间接排水方式。间接排水可采用深井泵或离心泵，台数不少于2台，不设备用泵。当水泵用于排除上下游闸门漏水时，水泵处于自动控制运行状态。

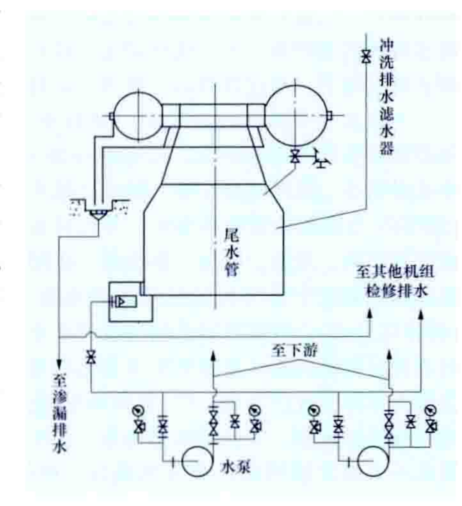


图1 采用直接排水方式的检修排水系统示意图

渗漏排水系统 排除厂房渗漏水，主要包括厂房水工建筑物的渗水、厂内各种设备的弃水和漏水。渗漏水汇集到渗漏集水井，采用深井泵、离心泵或射流泵按集水井水位自动控制排水，如图2所示。除工作泵外，渗漏排水系统至少应设置1台备用泵。

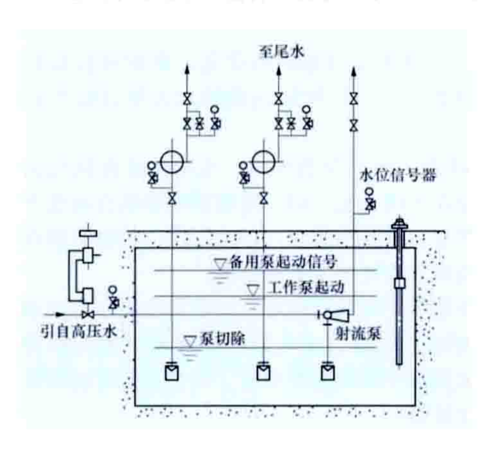


图2 渗漏排水系统示意图

shuidianzhan quanchang jizhong jiankong xitong

水电站全厂集中监控系统

(centralized supervisory control system of hydropower station) 用于对水电站全厂及其机电设备实现集中监控的由电气、电子设备构成的系统。一般设在水电站中央控制室。

采用计算机的全厂集中监控系统有两种方案：①以计算机监控系统为基础，辅以一定功能的常规监控设备；②以常规监控设备为基础，辅以一定功能的计算机监控设备。

以计算机监控系统为基础的全厂集中监控方案 其基本特点：①全厂集中监控完全或基本上依靠计算机监控系统；②在中央控制室设置计算机监控系统的电站值班员控制台，电站值班员通过计算机监控系统操作员工作站的彩色屏幕显示器及键盘、鼠标实现对全厂的集中监视控制；③有些水电站设置模拟屏，模拟屏上布置电站电气主接线、监视仪表和信号器具，以及必要的操作器具（包括经由电缆或光纤连接到被控设备的停机、关闭机组进水口事故闸门或进水阀的紧急按钮等）。有些水电站则设置背投式或液晶式大屏幕显示器，可以显示与操作员工作站的屏幕显示器相同的画面，也有些水电站取消了模拟屏。

水电站采用以计算机监控系统为基础的全厂集中监控方案时，计算机监控系统通常设置机组、开关站等现地控制单元（local control unit，LCU），具有数据采集、处理及机组工况转换顺序操作及调节等功能。LCU在与计算机监控系统电厂控制级失去联系或电厂控制级设备失效的情况下能够独立工作，实行现地监控。机组LCU通常附设独立的常规继电器接线或专用可编程逻辑控制器（programmable logic controller，PLC），用于发生水力机械事故而LCU失效时事故停机的顺序控制。

以常规监控设备为基础的全厂集中监控方案 其基本特点：①电站中央控制室设置常规集中监控设备、硬布线构成的电站值班员控制台、模拟屏。电站值班员通过常规集中监控系统设备实现对全厂的集中监控。②设置计算机监控系统或专功能微机全厂自动化装置，实现常规设备所不能完成的某些全厂自动化功能，如全厂自动安全监视及事件自动记录、全厂自动经济运行等。

简史 早期的水电站全厂集中监控系统由常规监控设备（包括常规仪表、信号灯、电磁继电器、操作开关和按钮等）构成。发达国家从20世纪60年代起，中国从80年代起，开始在水电站采用计算机实现全厂集中监控。水电站最初采用的是以常规监控设备为基础的全厂集中监控方案，计算机监控设备起辅助作用。90年代以后，以计算机监控系统为基础的全厂集中监控方案成为大中型水电站全厂集中监控系统的主流方案。

shuidianzhan shuiku youhua diaodu

水电站水库优化调度

(reservoir optimized operation of hydropower station) 应用系统工程理论和优化方法建立实施的水电站水库水资源最优调配策略和方法。通过水库优化调度能提高水资源利用效率，获得增加发电量、提高保证出力等效益。水库优化调度需要确定优化目标、约束条件，建立调度模型，选择优化算法并付诸实施。

优化目标 水库在不同的阶段，期望使一个或几个功能（或指标）达到最优，这些功能（或指标）就是优化目标。

约束条件 通常包括水库最高和最低水位约束，系统负荷和电站出力约束，最大、最小下泄流量，水位变幅以及水库之间的水量平衡约束等。

调度模型 为实现水库优化调度目标而建立的一套计算方法和流程。常分为确定性优化调度模型和随机性优化调度模型。确定性优化调度模型是指在一定的时空范围内，将径流过程作为确定性的过程，通过优化求解得到确定性最优解，其结构简单，求得的最优效益是最大可能的值。确定性优化调度的径流过程主要来源于不同预见期的水文预报，预报误差往往影响优化成果的可靠性。随机优化调度模型将径流过程作随机变量处理，有显随机模型和隐随机模型两类做法。显随机模型方法复杂度高，计算工作量巨大，已较少应用；隐随机模型先利用历史的，或者随机生成的径流系列来

进行确定性优化计算，然后分析归纳调度策略，形成优化调度函数或优化调度图。

优化算法 水库优化调度模型的求解算法是水库优化调度的重要方法。数学规划方法最早被应用于解决水库优化调度问题。广泛采用的数学规划方法有线性规划方法、非线性规划方法、动态规划方法、网络分析方法等，其中最具代表性的是动态规划方法。由于动态规划易产生计算量呈指数倍数增长的"维数灾难"问题，围绕动态规划"维数灾难"问题的一些改进方法，如微分动态规划、增量动态规划和逐次优化算法等也获得广泛应用。随着水电站群规模的不断扩大，水库群优化调度问题的难度越来越大，大系统理论与方法被引入水库群优化调度中，大系统理论方法将一个复杂大系统优化问题分解为若干相对独立的子系统优化问题，给复杂问题的求解和方法的选用带来了极大的便利，可以根据不同层次问题的基本特征，构造不同的大系统模型，主要有大系统递阶模型、混合模型和广义模型三类。大系统递阶模型采用分解-协调、聚合-分解和分解-聚合等优化技术使系统降维；混合模型针对系统内不同的任务特点选择最适用的求解方法，混合使用多种有效方法，完成大系统的优化任务；广义模型除一般优化方法外，还引入专家系统、人机交互、层次分析、灰色系统等决策技术，共同完成水库群的优化问题。随着随机优化理论的逐步完善，一些智能优化方法被引入到水电站水库群优化调度中，代表性的方法有遗传算法、人工神经网络、蚁群算法、粒子群算法等。

水库优化调度类型 水库优化调度根据参与调度的水库数量，分为单库优化调度和库群联合优化调度；根据调度期的长短，分为中长期优化调度、短期优化调度和实时优化调度；根据调度优化的目标，分为单目标优化调度和多目标优化调度等。

单库优化调度和库群联合优化调度 单库优化调度是指单个水库的优化调度，优化模型相对简单，有比较成熟的求解方法，也是库群联合优化调度的基础。库群联合优化调度是通过统一考虑水电站库群彼此间的水力联系和电力联系，进行水文、库容和电力补偿，以充分发挥库群总体效益的一种优化调度方式。水电站库群包含无水力联系水电站群（并联式水电站群）、有水力联系的梯级水电站群（串联式水电站群）和混合水电站群（并联和串联同时存在的水电站群）。水电站库群中既有具备日调节、年调节和多年调节性能的水电站，又有无调节能力的径流式水电站。通过水库群联合调度可以利用各水库之间的水文不同步和水库调节性能的差别，取长补短，进行全系统水电站水库间相互补偿，增加水库群的水资源利用率和效益。

中长期、短期和实时优化调度 水库优化调度的时段数叫做调度期。不同水库对短期和中长期的定义不尽相同，短期和中期也没有明确的界限。一般而言，中长期优化调度的调度期可以是5～10天，也可以是月、季、年，甚至多年，如编制年度调度计划时调度期就是年，计算时段长通常取月或旬；短期优化调度的调度期一般在5天以内，计算时段长通常取日；实时优化调度的调度期一般为24h，时段长可取1h（24点）或15min（96点）。不同调度期的优化调度模型相互嵌套，可发挥各自的优势。一般情况下，长期优化调度依据的预报径流精度较差，但中长期优化调度方案对于保持水库长期水头具有重要参考价值。中期优化调度预报精度相对较高，可以通过发电预泄等优化技术减少水库的弃水，提高水资源的利用率；实时优化调度可以在满足电力系统负荷要求的前提下，通过提高运行效率，达到节水增发的目的。

单目标和多目标优化调度 水库单目标优化调度的常见目标函数有发电量最大、发电效益最大、保证出力最大、弃水量最小、耗水率最小等。随着流域水资源综合利用水平的提高，水电站水库很少有单一开发目标，如三峡电站水库就兼有防洪、发电、航运、供水和生态保护等多个目标。多目标优化调度中各目标的效益不能用统一的度量单位表达（即不可公度），且各目标之间利益相互矛盾和竞争，理论上是求矢量极值问题，需要采用多目标决策技术。多目标决策技术大体可分成三大类：① 非劣解生成技术，代表方法有多目标线性规划、多目标动态规划、ε约束法等，这类方法事先不必给定或明确决策者的偏好，提供的决策信息较丰富，但计算工作量较大；②基于决策者偏好结构的求解技术，利用权重、效用函数、优先级、理想状态等将向量（多目标）最优化问题转化为纯量（单目标）最优化问题，能一次性获取最佳协调解，计算工作量较小，但当问题过于复杂时，决策偏好的一致性很难保证；③交互式求解技术，代表性方法有逐步进行法（STEM法）、交互式替代价值权衡法等，根据部分明确的偏好引导生成非劣解集，通过不断地交互，最终取得最佳协调解。生产实践中广泛使用的是一种简化处理方法，选择主要目标进行优化，将次要目标转化为约束条件，从而使多目标优化问题转化为单目标优化问题。

发展趋势 随着水电开发的深入，水电站水库优化调度的内涵和任务也在不断变化。同一流域水库群联合调度涉及发电、防洪、航运、水资源利用，以及体制、机制和利益分配等问题，需要在理论研究上有所创新。

多种不确定性影响下的风险调度，如水库汛限水位的动态控制，就是对有防洪库容的水电站，在风险可控的前提下，利用水文气象预报开展的预泄预蓄、分期汛限或提前蓄水等短期优化调度策略。

生态环境保护与供水综合利用也是水库优化调度中研究的课题。

shuidianzhan shuitu baochi

水电站水土保持 (soil and water conservation of hydropower station) 为防治水电站建设所造成的水、土资源的流失所采取的预防和治理措施。水土保持措施的有效实施，可最大限度地恢复水电站建设区遭破坏的植被，有利于控制因建设造成的新增水土流失，使防治区域水土保持状况满足规划的目标。同时，对保障工程安全运行，有效利用当地有限的水土资源，减轻工程建设对周边生态环境的破坏程度，促进当地社会经济可持续发展有着积极的意义。

简史 据中国先秦史籍记载，大禹曾率领民众在黄河中下游地区"平水土"，"尽力乎沟洫"，即疏导洪水，修整田间水道，以防御水旱灾害，发展农业生产。这是中国最早见于文献的水土保持工作。西周初期（公元前11世纪）已经

很重视对农田的治理，《诗经》中"原湿既平，泉流即清"的诗句，就是当时平治水土的反映。秦代以后，农田开垦规模扩大，滥砍滥伐不断发生，加剧了水土流失。与此同时，广大劳动人民在发展农业生产的过程中，创造了许多行之有效的水土保持措施，如梯田、引洪漫地和淤地坝等。

20世纪上半叶中国开始进行水土保持科研工作。1940年，黄河水利委员会针对治理黄河工作的需要，提出了防治泥沙问题，并成立了林垦设计委员会，推动水土保持工作。1941年后，先后在甘肃天水、陕西长安、福建河田等地建立了水土保持试验区。

中华人民共和国成立后，中国对水土保持工作非常重视。1952年，政务院发出《关于发动群众继续防旱抗旱运动并大力推行水土保持工作的指示》；1956年，国务院成立全国水土保持委员会；1984年，成立全国水土保持协调小组。20世纪90年代，水土保持工作有了很大的进展，特别是1991年6月颁布的《中华人民共和国水土保持法》，为依法防治水土流失奠定了法律基础。2010年12月25日，《中华人民共和国水土保持法》（修订）由中华人民共和国第十一届全国人民代表大会常务委员会第十八次会议通过，为提高水土保持社会管理和公共服务能力，强化生产建设项目水土保持监管，推进水土保持依法行政提供了强有力的法律支撑。

水土保持措施　主要包括工程措施、植物措施和临时措施，治理的重点部位主要是渣场和料场，见图。



已建水电站渣场水土保持措施实景

工程措施　为防治水电站工程建设可能造成的水土流失危害，保护和合理利用水电站工程建设区内的水土资源而修筑的各项工程设施，包括渣场防护工程、防洪排水工程、护坡工程、土地整治工程、防风固沙工程等。

植物措施　为防治水电站工程建设引起的水土流失，保护与合理利用水土资源，对水电站工程建设过程中的地表扰动区，如存弃渣场、料场、施工辅助设施区、场内道路区等施工迹地采取造林种草及管护的办法，增加植被覆盖率，维护和提高土地生产力的一种措施。主要包括栽植行道树、造林、种草和封山育林、育草。

临时措施　为防治水电站工程筹建期和施工期内裸露边坡、临时堆土、渣料运输以及各类施工扰动区域水土流失的一种临时性措施。此类水土流失及产生的危害在施工结束后停止，如施工结束后仍继续存在，临时防护工程应结合永久防护工程布设。主要包括临时的挡护、覆盖、截排水及沉沙措施。

参考书目

王礼先．中国水利百科全书：水土保持分册．北京：中国水利水电出版社，2004．

王礼先．水土保持工程学．北京：中国林业出版社，2000．

shuidianzhan shuitu liushi

水电站水土流失

(water and soil loss of hydropower station)　在水力、风力、重力等外营力作用下，水电站建设过程中，对水土资源和土地生产力的破坏和损失。水土流失包括土壤侵蚀及水的损失。

水土流失的成因　水电站建设过程中产生水土流失的原因有自然原因和人为原因。自然原因主要包括地貌、气候、土壤（地面组成物质）、植被等因素。人为原因主要指在建设过程中因损坏地表植被，形成大面积裸露地表，改变土壤结构，导致水土保持功能的降低或丧失。

水土流失的危害　水土流失不仅会造成土地资源的破坏，导致农业生产环境恶化、生态平衡失调，严重的可能导致河道淤塞，影响行洪安全。具体危害包括：①破坏土地资源，影响当地农业发展；②泥沙淤积河床，加剧洪涝灾害；③泥沙淤积水库、湖泊，降低其综合利用功能；④影响工程区及周边地区生态环境；⑤对电站自身建设和运行安全造成不利影响。

水电工程建设对水土流失的影响　影响范围主要包括枢纽工程区、场内交通道路施工区、施工工厂设施区、存弃渣场区、料场开采区、移民安置区等区域，产生水土流失的重点部位主要是弃渣场和料场。

枢纽工程区　工程施工对水土流失的影响主要是枢纽建筑物地基及边坡的开挖所致，造成水土流失的主要环节有开挖、弃渣、围堰的填筑及拆除等。开挖形成新的裸露坡面，原有地表的水土保持功能丧失，尤其是坝基坝肩等部位，边坡开挖范围大，在坡面水力和重力的双重作用下，易造成滑坡、崩塌等水土流失危害。枢纽工程施工活动一般都沿江进行，开挖、弃渣及运输过程中的土石渣，极易散落于沿江两侧坡面或进入江中。

场内交通道路施工区　在施工道路建设过程中，路基的开挖、填筑施工将产生一定的水土流失。永久公路建成后，使用过程中路面被硬化，无明显水土流失，但边坡还存在一定程度的水土流失。临时道路停止使用后，在后期迹地恢复初期也存在一定程度的水土流失。

施工工厂设施区　施工工厂设施区的水土流失主要发生在施工场地的平整、临建设施建设、场地使用及临建设施拆除等施工环节中。施工场地平整和临时设施建设，在工程筹建期进行，建设过程中地表植被被破坏，植被覆盖度低，原有排水系统被破坏，土体抗侵蚀能力降低；在工程建设期，场地处于使用过程中，破坏的植被不能得到恢复，地表处于裸露状态；施工结束后，拆除临建设施的过程中，产生大量建筑垃圾，压损土地，造成水土流失，影响土地生产力。

存弃渣场区　堆渣改变了原有地面坡度和地形条件，渣体占压损坏了地表植被。一般规划的弃渣分沟道型和沿江型两类。沟道型渣场所在冲沟汇水面积大，可能产生的洪峰流

量大，加之工程弃渣过程持续时间较长，沟道内弃渣不断增加，渣场不断形成新的堆渣区域，最后大量松散土石渣堆置于沟道，为水土流失提供大量物质源；沿江型渣场若不采取护坡措施，洪水位以下的弃渣将可能全部被洪水冲走，并影响整个渣场稳定。

料场开采区　料场开采扰动范围较大，开采过程中地表植被破坏殆尽，裸露的土体坡面抗侵蚀能力低，遇暴雨造成的水土流失强度较大。另外，在石料运输过程中，也存在遗撒的可能性。

移民安置区　移民安置区水土流失主要发生在拆迁、房建、水利设施配套、交通设施建设等环节。拆迁产生建筑垃圾，房建、交通设施的基础开挖等建设过程中，开挖、填筑形成新裸露地表，地表抗侵蚀能力降低或丧失，从而造成一定程度的水土流失。

参考书目

王礼先．中国水利百科全书：水土保持分册．北京：中国水利水电出版社，2004.

《中国大百科全书·环境科学》编委会．中国大百科全书：环境科学．北京：中国大百科全书出版社，2002.

shuidianzhan tongxin

水电站通信　(communication of hydropower station)

利用信道传递水电站施工、运行、管理等语音、图像及各类数据信息的设施。它是电力系统安全、经济运行和提供优质电能的重要技术手段，是实现水电站调度自动化和管理现代化的基础。水电站通信是随着电网规模的扩大和通信技术的发展而发展起来的，20 世纪 70 年代以前主要是依靠电力线载波通信，另外利用明线载波通信以及音频电缆和特高频通信，交换机一般是步进制、纵横制等机电式设备。80 年代以来开始采用数字微波、卫星通信、光纤通信和程控交换机等设备，并将实现综合业务数字网。

水电站通信主要包括厂内通信、电力系统调度通信、梯级水电站通信和水电站群集控通信、施工通信、防汛通信、水情测报通信、应急通信等。

厂内通信　主要包括厂内生产调度通信、厂内生产管理通信、厂区及生活区综合通信线路网络。

(1) 厂内生产调度通信。水电站中控室通过数字程控调度交换机与各个生产部门进行生产调度的通信。调度交换机的容量由水电站的枢纽布置、装机容量、机组台数、自动化和远动化的程度等因素确定。调度交换机主要用于通话、调度员发出指令、召开会议、事故录音；当部分调度用户为流动用户时，也应与之有效连接。

(2) 厂内生产管理通信。水电站各个生产部门及生活区通过行政数字程控交换机进行生产管理通信。用户终端主要布置在生产部门及生活区的管理部门，兼作生产调度通信辅助手段，并通过中继线或直通用户线与当地电话局、电力系统以及各有关部门进行通信联系。行政交换机的容量及台数由枢纽布置、装机容量、厂区至生活区的距离以及用户终端数量确定。

(3) 厂区及生活区综合通信线路网络。水电站各个生产部门以及生活区根据多种不同通信传输要求，设置的组成通信线路网络的通信设施。它能支持话音、多种计算机数据及视频等系统的开放式线路网络。

电力系统调度通信　传递水电站与电力调度主管部门之间的生产管理、生产调度及系统调度自动化数据和水电站至出线对端变电站或升压站之间的通信。一般采用光纤、微波接力、电力线载波机或卫星等通信方式。

梯级水电站通信和水电站群集控通信　根据梯级水电站和水电站调度管理及各种信息传输的需要，设有以梯级调度和水电站群调度为中心的调度管理通信设施，并设置调度交换机和行政管理交换机。其通信方式可以根据工程实际情况采用数字光纤、数字微波、卫星及移动通信等；当有电力线可利用时，有线通信方式也可选用电力载波机通信和架空地线复合光缆通信。为保证调度管理中心至各水电站的通信不中断，系统通信应具备两种独立通道。

施工通信　根据水电站施工工地的调度管理具体情况建立的调度管理通信设施。施工通信包括施工工地内部通信和施工工地对外通信。施工工地内部通信主要由施工指挥调度通信、生产管理通信以及综合通信线路网络组成；施工工地对外通信主要由施工工地对电力系统通信和对当地电信局（所）之间的中继联络及与有关部门、单位之间的通信。对电力系统通信方式根据工程实际情况选用数字光纤、数字微波和电力线载波。

防汛通信　水电工程防洪、安全度汛所设立的通信设施。它包括水电工程防汛通信、防汛指挥通信和抗洪抢险通信。水电工程防汛通信设施应能与国家防汛主管单位以及各有关部门有效连接。通信方式主要包括短波、光纤、微波以及卫星等。

水情自动测报系统通信　通过无线电波进行水文数据传输的通信，是水电站防洪调度、安全度汛和经济运行的基础。它的主要通信方式为短波、超短波、卫星和公众通信等，多采用超短波、卫星和公众通信方式，较少采用短波通信方式。

(1) 超短波通信。利用波长为 10～1m（相应频率为 30～300MHz）的无线电波进行信息传递的一种无线电通信方式；水情自动测报系统通信使用频率为 230MHz（国家无线电管理委员会批准频率）；其工作体制为自报式、应答式两种体制；系统数据传输速率为 150、300、600bit/s，不宜超过 1200bit/s；系统误码率不超过 10^{-4}；系统的通信组网一般由遥测站、中继站和中心站组成。

(2) 短波通信。利用波长为 100～10m（相应频率为 3～30MHz）的无线电波进行水文信息传递的一种无线电通信方式。短波分为天波和地波两种，天波是无线电波靠电离层反射进行信息传递，地波是无线电波沿地面传递水文信息。在水情测报系统短波通信中，工作体制多采用应答式，系统由中心站、遥测站组成。

(3) 卫星通信。利用同步通信卫星作为中继进行水文信息传递的一种无线电通信方式。采用：①VSAT 小型地面站（同步通信卫星），它由主站、小站、中心站及转发器组成，其工作频段采用 Ku 波段，其频率为 13～15GHz；②北斗卫星，由空间卫星、网管中心和用户终端组成，拥有中国自主知识产权，是中国水情自动测报系统的主要通信方式；③INMARSAT-C 海事卫星，它由地面遥测站、卫星和中心站组成，其工作频段为 L 波段，其频率为1.3～1.6GHz。它们的工作原理与超短波基本相同，即遥测站通过卫星中转至主站后，再从主站经卫星转接至测报系统的中心站。

(4) 公众通信。利用公用通信网络实现，可以节省大量

维修工作，但由于公用通信网的发展在地域上还不平衡，而且不是自建系统，难免出现信息堵塞和覆盖不到的现象，因此，公用通信网在水文自动测报系统中应用时要注意与有关部门协商，争取专项服务，主要包括公众电话网、移动通信网（GSM、CDMA）和数据通信网等。

应急通信　在发生地震等重大突发性事件的极端情况下，为保证水电站最基本的对外通信联络，配置卫星便携式电话设备，可采用 VSAT、铱星卫星通道。

shuidianzhan xiaofang

水电站消防　(fire protection of hydropower station)

为防止水电站火灾发生和减少水电站火灾危害，保护人身、财产安全，对水电站各类建筑物、构筑物、主要机电设备采取的防火和灭火措施。防火措施主要包括建筑物火灾危险性及耐火等级分类，建筑物和设施防火间距确定，厂区消防设施配置，相应灭火设备设置，消防电气和动火作业规范。灭火措施主要包括隔离、窒息、冷却等灭火法。水电站主要设施设备灭火装置和灭火方法分类见表。

水电站主要设施设备灭火装置和灭火方法分类

设施设备名称	灭火装置	隔离灭火法	窒息灭火法	冷却灭火法
水轮发电机	固定式水喷雾和二氧化碳		√	√
电力变压器	固定式水喷雾	√	√	√
电力电缆	固定式水喷雾	√	√	√
充油配电装置	固定式水喷雾和移动灭火器	√		√
中央控制室、电气二次盘柜室、通信机房	固定式清洁气体灭火和移动式灭火器		√	√
油存储系统	固定式水喷雾和移动灭火器		√	√

建筑物火灾危险性及耐火等级分类　GB 50016—2006《建筑设计防火规范》将工业建筑物的火灾危险性分为甲、乙、丙、丁、戊 5 类。根据 SDJ 278—1990《水利水电工程设计防火规范》的规定，属于丙类火灾危险的水电站建筑物有：油浸式变压器（电抗器、消弧线圈）室，单台设备充油量大于或等于 100kg 的配电装置室，中央控制室、继电保护盘室、计算机房、通信室，户外主变压器，电缆室、电缆隧道和竖井，防酸隔爆型铅酸蓄电池室，柴油发电机室及其检修间，绝缘油、透平油的油处理室、再生室、储油罐室以及独立变压器检修间等。其他建筑物为丁类或戊类。

建筑物和设施防火间距　为减轻或阻止火灾蔓延，各建筑物间要隔开一定距离，称为防火间距。防火间距与建筑物的火灾危险性类别及其耐火等级有关。防火间距的数值在 SDJ 278—1990 中有明确规定。

厂区消防设施　水电站厂区应配置消防报警系统、消防供水系统（含水池、管网、消防栓、喷淋装置等）、排烟消烟系统、消防车道等消防设施。

灭火设备　消防车、消火栓、手提式灭火器、推车式灭火器、沙箱等。

消防电气　消防用电设备的电源应按二级负荷供电。厂房内主要疏散通道、楼梯间、消防电梯及安全出口处，均应设置火灾事故照明、疏散指示标志和灯具。大型水电站按规范规定，设置火灾自动报警系统；火灾自动报警系统能在火灾发生后联动阻断空气和排烟消烟设施。

动火作业　禁止在具有火灾、爆炸危险的场所吸烟和使用明火。因施工等特殊情况需要使用明火作业的，应当按照规定办理审批手续或动火工作票，采取相应的消防安全措施；作业人员应当遵守消防安全规定。进行电焊、气焊等具有火灾危险作业的人员和自动消防系统的操作人员，必须持证上岗，并严格遵守消防安全操作规程。

隔离灭火法　将火源处或其周围的可燃物质隔离或移开，燃烧会因缺少可燃物而停止。包括将火源附近的可燃、易燃、易爆和助燃物品搬走，关闭可燃气体、液体管路的阀门，拆除与火源毗连的易燃建筑物等。

窒息灭火法　阻止空气流入燃烧区或用不燃物质冲淡空气，使燃烧物质得不到足够的氧气而熄灭。包括封闭起火的建筑、设备的孔洞等。

冷却灭火法　将灭火剂直接喷射到燃烧物上，以增加散热量，降低燃烧物的温度于燃点以下，使燃烧停止；或者将灭火剂喷洒在火源附近的物体上，使其免受火焰辐射热的威胁，避免形成新的火焰。

shuidianzhan xiaoyi

水电站效益　(economic benefit of hydropower station)

水电站为国民经济提供物质产品和服务的价值。物质产品为电力和电量，服务主要是兴利除害等经济效益和社会效益。水电站效益计算是水电站经济评价的重要内容。从国家经济整体角度计算的水电站效益，称为经济效益，包括直接效益和间接效益两个部分。从业主角度计算的可获得的财务收入，称为财务效益。

经济效益计算　特点有：

（1）电是不能大量储存的产品，电力系统必须同时完成发电、输电、配电和消费各项任务。水电站是电力系统的组成部分，其运行方式受用电负荷、其他电站和输变电设备等能力的约束，而水能资源又有随机性，与电力系统电力、电量需求无关。因此，水电站所能利用的天然水能资源有一部分不能转化成为有效的电力、电量，所以要从电力系统整体来分析计算水电站可实现的效益。对兼有防洪、供水、航运等综合利用的水电站，则要根据包含电力和其他有关行业的系统进行分析计算。

（2）在服务期内，水资源系统和电力系统的条件可能有变化，如用电负荷的增长、在水电站上下游修建新水电站、综合利用任务的增减以及电力系统电源构成的变化等将导致水电站效益的变化，因此要计算服务期内水电站的总效益。

（3）水能资源是有一定分布规律的随机量，其满足系统负荷要求的程度是随机的，所以水电站效益要用数理统计方法计算。供电效益有两种计算方法：一种是以某供电可靠度为条件，据此计算水电站可提供的电力、电量效益的数学期望值；另一种是选择某保证率的来水情况计算水电站的电力效益，并以多年平均年电量为电量效益，据此计算水电站的

年效益。中国一般采用后一种方法，选择的保证率为80%～98%。(见保证出力)

直接效益　直接效益的计算主要用于水电站经济评价。直接效益包括内部效益和外部效益两部分。

(1) 水电站项目内部效益是由本项目提供产品的价值。包括：①本项目提供电力、电量的发电效益。②本项目水库蓄纳洪水，减免水灾损失。③增大供水量、扩大供水范围、提高供水保证程度，从而增大工农业产值或降低供水费用。④增大河道通航能力、延长通航期、降低航运费用。⑤库区发展渔业、旅游等。⑥保护环境。

(2) 水电站项目外部效益是指本项目为其他部门的直接作用反映在外部的效益。包括：①使本项目下游水电站增加电量并部分提高供电质量，如增加保证出力和发电量等。②改善全电力系统水电站汛期与枯水期电量的分配比例，提高系统供电质量。③提高电力系统调峰能力，改善系统内火电厂的运行条件，从而节约火电厂燃料、减少运行费用、降低事故率、延长机组使用寿命等。

间接效益　也称社会效益或二次效益。一般难以用货币量计算。水电站在建设期投入大量资金和技术力量，吸收大量劳力，加快当地的城市化进程，土地升值，建成后向本地区供应电力，改善水资源利用条件，增强运输能力，从而促进地区经济发展，水电通过减少化石燃料消耗，减少 CO_2 等温室气体排放等均属间接效益。

财务效益计算　根据水电站向电力系统提供的电力和电量，相应的发电效益为容量效益和电量效益。发电效益主要包括提供可靠的容量、调峰填谷的电量转换（抽水蓄能电站）、调频、旋转备用、调相、快速跟踪负荷及提高系统可靠性等效益，这些效益应进行定量分析，但要防止重复计算。

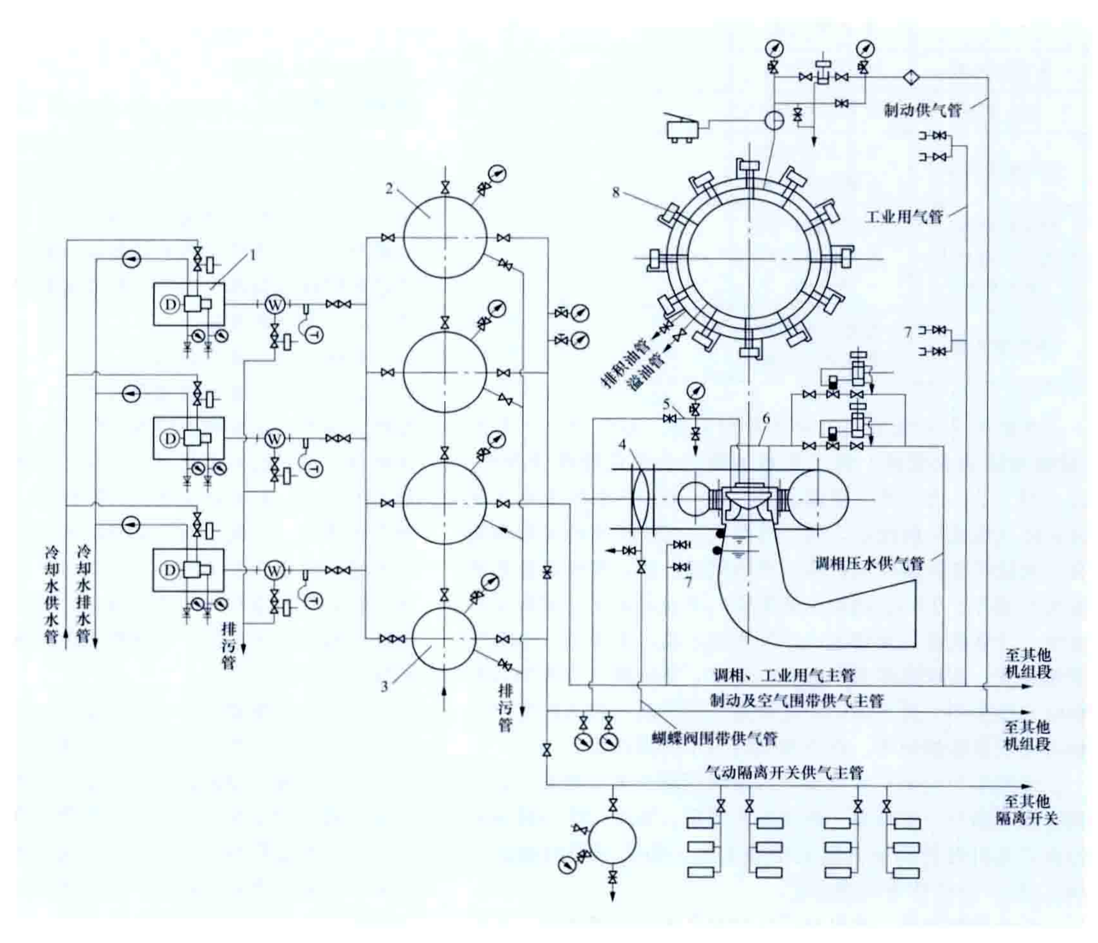
在按容量效益和电量效益计算财务收入时，按水电站提供的上网容量和上网电量及相应的上网容量价格和上网电量价格计算。

水电站的装机容量在考虑厂用电、检修、强迫停运等因素进行折扣后，可作为其用于计算年发电容量收入的年上网容量，当电站机组存在水头受阻、设备缺陷、水库调节库容不足等因素时，还应考虑这些因素对年上网容量的影响；水电站的年上网电量需通过电力系统电源优化，由年电力电量平衡结果确定，当电力电量平衡未考虑厂用电因素时，还需对电力电量平衡结果按厂用电率进行折扣后作为电站用于计算年发电电量收入的年上网电量。由于兴建本电站对已建和在建水电站增产的电量价值，要根据实际情况和有关规定考虑能否纳入本电站。

当采用容量和电量两部制电价计算电站效益时，可按边际理论测算上网电价。电网因购买设计电站上网容量，从而可避免自己为取得峰荷单位容量所必要的费用（可避免容量成本），可作为确定容量价格的依据；电网因购买设计电站上网电量，从而可避免自己为取得单位电量所必要的费用（可避免电量成本），可作为确定上网电量价格的依据。

shuidianzhan yasuo kongqi xitong

水电站压缩空气系统　(compressed air system of hydropower station)　为水电站设备提供运行所需压缩空气，保证用户对气压、气量、清洁和干燥的要求，由空气压缩机和贮气罐及其附属设备、供气管网、测量及控制元件等组成的系统。按最高工作压力，压缩空气系统可分为低压气系统（0.1～1.6MPa，不含1.6MPa）、中压气系统



低压压缩空气系统示意图

1—空气压缩机；2—贮气罐；3—制动及围带供气专门贮气罐；4—进水阀空气围带；5—水轮机轴承检修密封供气管；6—调相压水供气管；7—检修供气；8—发电机制动闸

(1.6～10MPa，不含10MPa）和高压气系统（≥10MPa）。水电站一般不采用高压气系统。

水电站用气项目一般有：①水轮机调节系统及进水阀操作系统的油压装置用气；②机组停机时制动用气；③机组作调相运行时转轮室充气压水及补气；④维护检修及吹污清扫用气；⑤水轮机主轴检修密封及进水阀空气围带用气；⑥水轮机强迫补气用气；⑦灯泡贯流式机组发电机舱密闭增压散热用气；⑧水泵水轮机水泵工况充气压水起动用气；⑨配电装置和发电机空气断路器用气；⑩在寒冷地区闸门、拦污栅等处防冻吹水用气。

典型的低压压缩空气系统如上图所示，系统压力一般为0.7～0.8MPa。对于有压水调相、强迫补气需求的大型机组，用气量较大，一般单独设置供气系统。

油压装置对压缩空气压力的要求分别为2～4MPa和2.5～7MPa，要求空气清洁、干燥。中压气系统除装设中压空气压缩机外，管路中还要增加空气干燥器等设备，最常用和较为方便的方法是将空气加压到2～3倍工作压力后再降到工作压力使用的降压干燥法和装设空气干燥器。

压缩空气系统运行的可靠性和自动化要求高，需配置自动化控制元件，使其在允许的工作压力范围内自动控制运行，防止气压过高与过低。

shuidianzhan yingji guanli

水电站应急管理

(emergency management of hydropower station)　为了预防和减少突发事件的发生，控制和减轻水电站事故所引起的各类危害，保护水库大坝、水电站设备和人民生命财产安全，水电站运行管理单位所开展的相关工作。水电站应急管理主要内容包括应急预案、应急保障、应急培训、应急演练、应急响应等。

应急预案　面对突发事件，如自然灾害、重特大事故、环境公害及人为破坏的应急管理、指挥、救援计划等。

水电站运行、管理单位根据相关要求进行综合应急预案、专项应急预案和现场处置方案的编制。编制工作从水电站、水库大坝的危险源分析和事故隐患排查入手，收集所需的各种资料（包含相关法律法规、应急预案、技术标准、同行业事故案例分析、技术资料等），针对可能发生的事故，编制应急预案（现场处置方案）。应急预案编制完成、评审后，按规定报有关部门备案。

水电站需制订的应急预案主要有防洪、自然灾害、人身事故、电力设备事故、火灾事故、全厂停电事故、水淹厂房等内容。

应急保障　水电站运行、管理单位根据应急工作需求建立、完善各项保障措施，主要有通信与信息保障、应急队伍保障、应急物资装备保障、交通运输保障、治安保障、技术保障等。在完善保障措施时，应充分考虑水电站的地理位置和社会环境，加强与政府应急管理部门的协调，优化社会应急资源。

应急培训　水电站运行、管理单位根据水电站运行特点和应急预案，制订应急培训的计划、方式和要求。应急培训覆盖电站全体员工，使所有相关人员均掌握危险源的危害性、应急处置方案和相关技能等。必要时对水库上、下游沿岸居民进行逃生、疏散的培训。

应急演练　水电站运行、管理单位每年在汛期之前开展的包括备用（保安）电源的起动、泄洪设备的运用、水电站排水系统抽排能力试验、下游水位过高时关键部位的封堵、防暴雨倒灌，以及其他根据专题月、行业监管要求和单位实际生产情况开展的应急演练。应急演练结束后，根据演练评估报告的改进建议，对预案进行修订完善；根据应急演练评估报告、总结报告提出的问题和建议对应急管理工作进行持续改进，切实提高应急管理水平和应急救援能力。

应急响应　针对事故危害程度、影响范围和控制事态的能力，将事故分为不同的等级；按照分级负责的原则，明确应急响应级别。水电站运行、管理单位应根据事故的大小和发展态势，明确应急指挥、应急行动、资源调配、应急避险、扩大应急等响应程序；特别应注意对下游沿岸居民的影响，必要时启动相关政府的应急系统，确保响应、救援充分。

shuidianzhan you xitong

水电站油系统

(oil supply system of hydropower station)　为满足水电站机电设备的用油、排油及油的检验与处理要求，由油泵、油罐、油处理设备、油吸附设备、油化验设备以及相应管网、阀门、测量和控制元件等组成的系统。水电站油系统一般由透平油系统、绝缘油系统和油化验等3个相对独立的部分组成。

透平油系统　为发电机推力轴承和导轴承、水轮机导轴承等提供润滑油，为水轮机调速器、进水阀的油压装置提供操作用油，两项用油一般均统一采用运动黏度为20～$32mm^2/s$的透平油。

净油罐的容积应满足一台最大用油机组需油量的110%，油罐的数量应满足净油、污油的存放以及油的处理、更换等需要。压力滤油机和真空滤油机用于去除杂质和水分，以真空滤油机的脱水效果较好。配置的油泵应满足输油量和扬程的需要。

透平油罐室和油处理室多布置在厂房底层的专用房间内，人工操作，室内设通风排烟设备，并根据油罐容积大小配置相应的消防设备。

绝缘油系统　主要供给变压器、油断路器等电气设备用油。其功能、设备以及系统配置均与透平油系统类似。绝缘油罐室多为厂外布置，油处理室设在厂外专门的房间中，室内设通风排烟设备，并根据油罐容积大小配置相应的消防设备。

油化验　主要任务：对新油进行分析化验，按国家标准鉴定；对运行油定期取样化验，判断是否需要处理。水电站一般配置简易分析化验设备。

中小型水电站用油量少，油系统可简化。对梯级水电站，多在适当位置建立中心油务所，其贮油和油净化设备按梯级水电站中最大一台机组或变压器的用油量配置。中心油务所的油化验设备一般按全分析项目配置。

shuidianzhan yuancheng jizhong jiankong

水电站远程集中监控

(remote centralized supervisory control of hydropower station)　利用计算机、远动、通信技术，对某条河流、多条河流或其某个河段上的多个水电站（包括联合开关站、变电站）的运行实行不通过厂、站运

行值班人员的直接集中监视、控制的技术和运行管理方式。（见梯级水电站集中监控）

shuidianzhan yunxing fangshi

水电站运行方式

（operational mode of hydropower station） 根据水电站在电力系统中承担的任务而确定的调度运行策略。根据电力系统的负荷特性及水电站调节周期划分，可分为日运行方式、周运行方式、年运行方式；按水电站在电力系统中的作用，可分为带计划负荷运行方式、调频运行方式、备用运行方式和调相运行方式。

系统日负荷特性及水电站的日运行方式 系统负荷在一天的24h中变化较大，其形状因系统用户组成及其用电特性（生产的连续性及生产班制）而异。通常有2～3个峰。2个峰的高峰负荷多出现在上午及晚上。3个峰的负荷，除上午、晚上外，下午还有一个峰。低谷多出现在凌晨及中午。电力系统一天中的负荷，除有峰谷的变化外，还有随机跳动。在电力电量平衡计算中，系统日负荷是先将锯齿形的跳动修匀后，根据需要，以1h为单位，以柱状近似。一天中负荷的平均值与最大负荷的比值，称为日负荷率，常以γ表示。一天中的最小负荷与最大负荷的比值，称为日最小负荷率，常以β表示。γ及β值越大，表示日负荷变化越小；反之，表示日负荷变化越大。中国较大的电力系统，γ值一般为0.75～0.85，β值一般为0.50～0.70。电站在一天中担负某一固定的负荷，称为担基荷（基底负荷）；电站在一天中担负系统负荷的变动部分，称为担峰荷，也称调峰；若电站担负尖峰和基荷之间的部分，则称担腰荷。在同样保证出力的情况下，担峰荷的水电站，其装机容量较大，担基荷的水电站的装机容量较小，担腰荷的水电站的装机容量则介于两者之间。不受综合利用约束、运行条件较好的水电站适于担负尖峰负荷，其理由包括：①水电站增加装机容量的费用远低于火电厂，且水电站增加装机容量可得到额外发电量。②水电站机组起停灵活，跟踪负荷的速度快，且机组所担负荷不受技术最小出力的限制。③水电站调峰运行的电能损失较煤电调峰运行小。而火电厂（含核电站）适于担负基荷的原因为：①火电厂增加装机容量的费用较大。②火电厂机组起停不灵活，跟踪负荷速度较慢。③火电厂机组所担负的负荷受技术最小出力的限制。④火电厂担峰荷的煤耗远较担基荷大。抽水蓄能电站应在低谷负荷时抽水，在尖峰负荷时发电。日负荷图及水电站日运行方式见图1。

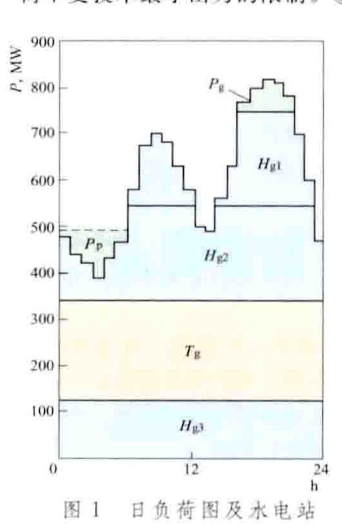


图1 日负荷图及水电站日运行方式

P_g—抽水蓄能电站带峰荷；P_p—抽水蓄能电站抽水；H_{g1}—水电站带峰荷；H_{g2}—水电站带腰荷；H_{g3}—水电站带基荷；T_g—火电厂带基荷

系统周负荷特性及水电站的周运行方式 对于系统一年52周运行方式的研究，一般可将一年12个月每个月的负荷特性概化为一周7天的日负荷曲线进行。系统在周内的例假日，负荷明显下降，而工作日则维持较高的负荷，但也有一定的波动，一般假日前后的负荷低于其他工作日的负荷。系统一周的平均负荷除以周内日平均负荷的最大值所得的商，称为周不均衡系数，通常以σ表示。参加系统中运行的水电站和火电厂均有其不同的周不均衡系数。水电站在假日宜少发电，将能量储存下来，增加工作日的能量和出力，使火电厂以较均匀的出力工作，称为周调节。进行周调节的水电站，应具有足够的周调节库容。研究水电站和火电厂的周运行方式，较严格的方法宜用一周7天的日负荷曲线进行，原则和方法与日运行方式类似。为了简化计算，对进行周调节的水电站，可将其周平均出力乘以大于1的周调节系数，化为周最大负荷日的日平均出力，据以研究日的运行方式。水电站的周调节系数即为其周不均衡系数的倒数。计算水电站周调节系数时，应满足下式

$$E_s/\sigma_s = E_h/\sigma_h + E_t/\sigma_t$$

$$E_s = E_h + E_t$$

式中E_s、E_h、E_t为电力系统、水电站、火电厂的周电量；σ_s、σ_h、σ_t为电力系统、水电站、火电厂的周不均衡系数。

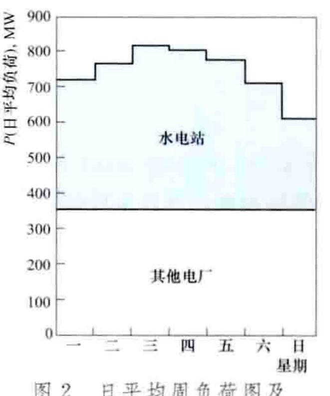


图2 日平均周负荷图及水电站周运行方式

例如，某电力系统E_s=50亿kW·h，σ_s = 0.92，E_h=20亿kW·h，为维持火电厂小修，取σ_t=0.98，则可求得σ_h=0.843，相应其周调节系数为1.19。

图2所示为水电站担负周负荷的变动部分，火电厂担负固定部分。月运行方式可以周运行方式来代表。

系统年负荷特性及水电站的年运行方式 电力系统年负荷，通常以月最大年负荷曲线及月平均年负荷曲线来表示。西方国家也有用一年52周的周最大年负荷曲线及周平均年负荷曲线来表示的。年负荷曲线分静态和动态两种。静态负荷曲线是按负荷的年增长，在年初以台阶形发生，而不是在年内均匀增长，即年初最大负荷等于年末最大负荷，而下一年初的负荷比上一年末的负荷大了一个“台阶”。动态负荷曲线是按年内均匀增长处理，即年末负荷大于年初负荷。由于日照随季节而变化，形成照明负荷夏季小、冬季大，寒冷地区冬季负荷大，故在照明负荷比重较大和寒冷地区的系统具有冬季大、夏季小的特性。有些系统由于排灌负荷或夏天制冷负荷的影响，也可能形成排灌季节或夏季较大的“驼峰”。电力系统年平均负荷除以年内月平均负荷的最大值所得之商，称为年不均衡系数，常以ρ表示；在无季节性负荷时，按静态的负荷曲线，中国较大的电力系统的ρ值为0.9～0.95。有季调节以上能力的水电站，其出力在年内的分配，应尽量适应系统负荷在年内的变化。以降雨径流为主的水电站，枯水季多在冬、春季。为充分发挥水电站的容量和调峰效益，在冬、春季枯水时担负系统的尖峰负荷，在夏季水多时担负系统的基荷或腰荷；在一年中季节性负荷下降时，多安排电站机组检修。若夏季安排一定的季

节性用户，有利于充分利用水能资源。年负荷图及水电站年运行方式见图3。图3显示出水电站在枯水季节尽量担负年负荷变动部分，使火电厂按均衡出力工作，在汛期由于来水丰富，水电站以较大的出力运行。

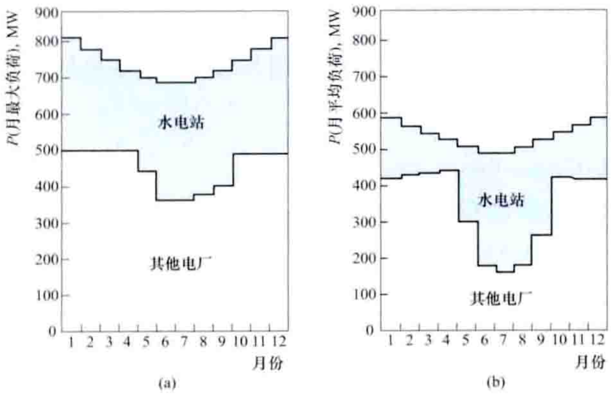


图3 年负荷图及水电站年运行方式（静态）
(a) 月最大负荷；(b) 月平均负荷

水电站调频运行方式 水电站随时调整所发出力，以适应系统负荷的随机跳动，使系统供电频率维持在允许范围的运行方式。水电站机组起停灵活，增减出力迅速，能较好地跟踪负荷，担负调频任务。担任电力系统负荷备用任务的电站，通常称为调频电站。一般情况下，宜由水电站调频。只当汛期水电站以全部出力带基荷时，才将调频任务转移到火电厂。担负调频任务的水电站的机组，其所带的最大计划负荷应小于其预想出力（最大可能出力）。预想出力与所带最大计划出力的差值的一部分或全部可作调频用，称为旋转备用方式。

水电站备用运行方式 水电站担负负荷备用的运行方式为调频运行方式；水电站担负由于系统其他电站机组事故停运，或输变电设备发生事故而被甩掉的负荷的运行方式为事故备用方式。

由于水电站机组起停灵活，增加出力迅速，故能较好地担负系统事故备用。水电站担负系统事故备用，可分正常备用与短期备用两种。担负正常备用时，备用容量的运行时间需延续到事故处理完为止，按中国有关规范规定，水电站需预留在事故运行时间基荷工作的相应水量，应为3～10天基荷的水量。备用水量若由上游水库预留，则本库应预留与上游水库放水流达本库的时间相应的水量。担负短期备用时，正常备用由火电厂担负，备用容量的运行时间为当系统发生事故时，先由水电机组备用容量担负被甩负荷，至正常备用火电厂担负这部分负荷为止，需预留的备用水量较少。

水电站调相运行方式 水电站不带有功负荷，当调相机用。对于安装高程较低的安装反击式水轮机的水电站，有时需考虑用空气压缩机将水压离转轮室，使水轮机不带水转动。（见水轮发电机组调相）

shuidianzhan yunxing guanli

水电站运行管理 (operation management of hydropower station)

保证水电站设备安全、经济运行所采取的技术措施和管理手段。主要包括电站设备运行实时监控与维护、经济运行、值班方式、设备状态评估与机组检修等内容，多采用电站生产管理信息系统来实现。

实时监控与维护 按照安全工作规程和电站运行规程要求，进行电站设备运行状况的实时监视、设备起停操作与控制、负荷调整；定期保养设备，开展现场设备巡视检查，及时发现、消除设备缺陷；按规定定期进行设备预防性试验，提早发现隐患，及时采取措施，防止事故发生等。

设备起停操作、功率调整和运行工况监视 值班员按调度命令进行发电机组等设备的起停操作；为维持调度要求的电力系统频率、全厂总输出功率以及母线电压值进行有功、无功的调整；通过计算机系统和其他监视手段实时监视各设备运行工况是否正常和符合要求。

定时巡视检查 值班员按规定定期对设备进行现场巡视检查，主要检查水轮发电机组振动和摆度、异音、异味、励磁碳刷有无火花现象，推力轴承和各导轴承油槽油位、油质，水轮机室止水盘根漏水情况；调速器油压装置油面、油压，导叶开度；变压器温度、油位以及断路器油面、气压情况等。

定期测试 按照电站运行规程要求，值班员定期对设备运行的主要技术性能参数进行测试，如发电机滑环温度（一般用红外测温方式）、发电机风洞环境温度、环境温度较高部位区域的电气一次设备导体表面温度、因特殊要求暂时处于不稳定工况区运行机组各导轴承的摆度等。

定期预防性试验 水电站机电设备按预防性试验规程进行定期测定，早期发现设备潜在缺陷，是确保设备安全运行的重要措施。主要试验内容包括水轮发电机绝缘电阻及泄漏电流的测定、变压器绝缘的介质损耗因数测定、绝缘油色谱分析、断路器绝缘的介质损耗因数测定、避雷器绝缘电阻及泄漏电流的测定、设备耐压试验等。

经济运行 在保证水电站设备运行安全的前提下，合理安排机组和厂用电运行方式，降低全厂厂用电率、变损率等；采取措施尽量使机组在最优效率区运行，进行运行机组间负荷的经济分配，降低发电水耗（见水电站经济运行）。对于同一河流上多级开发的梯级水电站，实行一厂多站统一调度、集中控制，全面提高梯级水电站水能利用效益（见水电站水库优化调度）。

值班方式 电站运行人员按照规定的方式开展电站运行管理工作，保障电站设备安全稳定运行。（见水电站值班方式）

设备状态评估 根据监控系统、设备趋势分析系统、设备状态在线监测系统及日常巡检试验等所采集的数据和相关信息，及时和定期对设备运行状态进行评估，判定设备的性能状况，分析发现潜在缺陷等。根据评估结果，电站管理者有针对性地安排消除缺陷、提升可靠性等设备检修工作计划。

机组检修 水电站的设备集中检修期通常安排在每年的枯水期，机组检修按照管理属性分为计划检修和状态检修；按检修项目规模分A、B、C、D 4个检修等级。（见水轮发电机组机电设备检修）

电站生产管理信息系统 随着计算机和网络技术的发展，大多数水电站都通过建立一套专用的计算机系统来实施电力生产过程相关信息的管理，提高电站运行管理的效率和科学化水平。（见水电站管理信息系统）

各国对电站设备的运行管理工作随着技术发展水平的不同而有所差异，有的水电站已经采用无人值班的方式，对电站设备实行远程监视和控制，所有运行参数均由计算机监控系统存储和累计，进行定期分析，据此决定设备的维修或更新，保证电站设备处于良好状态。

进入21世纪，中国新建大中型水电站普遍使用计算机监控系统对电站所有设备实现自动化监视与控制，设备起停操作、功率调整、设备状态监视、运行参数记录等工作均由计算机监控系统自动完成。

shuidianzhan zhaoming xitong

水电站照明系统 (lighting system of hydropower station) 为满足水电站各工作场所的照明需要，由照明变压器、配电设备、照明器以及连接导体等组成的系统。水电站照明方式分一般照明、局部照明及混合照明。一般照明是不考虑特殊局部的需要、为照亮整个场地而设置的照明，要求在整个被照面上（包括工作面及非工作面）照度基本均匀。局部照明是为满足某些部位的特殊需要而设置的照明，仅局限于工作部位固定的或移动的照明。混合照明由一般照明与局部照明共同组成。

一般照明分为正常照明（工作照明）和应急照明（事故照明）两类。正常照明是指在正常情况下使用的室内外的照明，还包括警卫照明、标志照明、障碍照明及诱导照明。应急照明是指因正常照明的电源失效而启用的照明，用来供给值班人员继续工作或安全疏散用，包括备用照明、安全照明和疏散照明。

中小型水电站通常采用照明与动力由共用的厂用变压器供电，大型水电站和调峰水电站采用照明与动力分开供电的方式。电压波动较大时，需采用照明专用有载调压变压器。照明供电电压交流为380/220V，直流为220V或110V。为确保人身安全，供检修用的照明，其供电电压采用交流24V（以前曾采用36V）及以下。水电站事故照明电源正常由交流电供给，交流电源故障时，通过交直流电源自动切换装置切换至直流供电。

shuidianzhan zhiban fangshi

水电站值班方式 (on-duty arrangement of hydropower station) 对水电站运行人员工作的管理方式。一般分为现场值班、无人值班和少人值守。

现场值班　水电站全天24h都有值班人员，在集中控制室或机组附近值班；负责监视、调整机电设备运行的方式、参数，对管辖的设备、区域进行巡视检查和定时测试，进行设备有关的操作等。

无人值班　水电站内不安排固定值班人员，设备监视、操作和控制均在厂房外控制室或上级调度所进行。无人值班要求厂内机电主设备完好率高，机组调速、继电保护和励磁系统可靠；装设良好的计算机监控系统，机组起停、出力调整、运行监视等功能实现远方监控，不需现场人工干预。

少人值守　结合中国国情提出的向无人值班过渡的一种值班方式。厂内不需要全天24h都有人值班，机组起、停、调相等工况转换操作，有功、无功功率调整以及运行监视等工作，由上级调度所或厂外集中控制的值班人员及有关自动装置完成；在厂内仍有少数全天24h都在的值守人员，负责现场看守和应急处理。随着中国水电开发的推进，华能澜沧江公司、国电大渡河公司等都对流域梯级水电站群实施“流域集控、现场值守”的模式。此模式的主要特点是：同一流域的多个电站的运行设备监视、起停机组、负荷调整、方式倒换等由流域集控中心负责，现场值守的主要工作为巡回检查、设备轮换、隔离措施等。

shuidianzhan zidong dianya kongzhi

水电站自动电压控制 (automatic voltage control of hydropower station) 在满足各种限制条件的前提下，按维持电站高压母线电压在一定水平或按给定全电站无功功率的要求，进行机组间无功功率分配。属于电力系统自动电压控制的子集。机组间无功功率的分配一般要考虑：①无功功率的调整量由参加水电站自动电压控制的机组分担。②运行机组间的无功功率可选用平均分配、按机组承担无功负荷的能力成比例分配或按等功率因数分配等原则。③当电站的升压变压器配备有载调压抽头时，机组无功功率的调整要与变压器的抽头调节相配合。一般在调整变压器抽头之前，应最大限度地利用发电机的电压调整范围。④要考虑机组的定子和转子的发热、定子端电压的允许范围及机组稳定运行范围等限制条件。

过去，自动电压控制采用模拟式单功能装置实现。在水电站采用计算机监控系统后，自动电压控制功能成为其诸多功能中的一项。

shuidianzhan zidong fadian kongzhi

水电站自动发电控制 (automatic generation control of hydropower station) 在满足各种限制条件的前提下，迅速、经济地控制水电站有功功率。属于电力系统自动发电控制的子集。电力系统自动发电控制对水电站的控制方式有两种：①调度中心直接下达各机组的有功功率给定值；②调度中心下达水电站的总有功功率给定值。在后一种情况下，水电站自动发电控制以经济运行为原则，确定电站机组运行台数、运行机组的组合和机组间的负荷分配，实现总有功功率给定值的目标。在完成这些功能时，要避免由于电力系统负荷短时波动而导致机组的频繁起停。（见水电站经济运行）

控制依据　包括：①电力系统调度中心根据电力系统自动发电控制的要求，下达的全厂发电负荷曲线或实时给定的电站总有功功率；②电站的当前水头及其对应的机组效率特性。在满足总有功功率给定值的前提下，所选的开机组合和机组间功率分配应使总耗水量最少。

限制条件　包括：①机组及主设备的健全状况；②避开机组的空蚀区和振动区；③电力系统对电站要求的备用容量；④上、下游水位限制及下游用水量要求；⑤防洪的要求；⑥避免机组频繁起停。

简史　在水电站自动化的早期，使用单功能装置完成其中的部分任务。20世纪20年代末出现了自动操作器，以解决水电站的工作条件改变时，自动确定运行机组最优台数及组合问题。其后，出现了频率和有功功率成组调节装置，以解决

机组间的负荷分配问题。这些装置的应用，提高了水电站自动化水平和经济效益。但这些装置都是用继电式和模拟式设备来实现的，调节精度低、考虑的条件有限，只能用简单的或近似的控制规律，因而功能和结构都比较简单。水电站采用计算机监控系统后，自动发电控制功能成为其诸多功能中的一项。

shuidianzhan zidonghua

水电站自动化 (automation of hydropower station)

采用机械、电气和电子设备，按预定要求代替人工进行水电站生产作业的技术。按系统划分，包括单机自动化（见水轮发电机组自动控制、水轮机调速器、水轮发电机励磁）、辅助设备系统自动化（见水电站辅助设备自动控制）、全厂综合自动化（见水电站计算机监控系统）和梯级电站自动化（见梯级水电站集中监控）。按功能划分，包括自动控制、安全监视、经济运行、维持电力系统稳定运行和电站运行管理自动化等。自动化的目的在于提高水电站运行的安全性、经济效益、劳动生产率和供电质量。

自动控制　包括机组的正常起停控制和事故停机控制，辅助设备（即油、气、水系统）的自动起停控制及有功功率和无功功率的自动调整等。如果发生了危及设备安全的事故，除发报警信号外，还使设备停止运行。

安全监视　对电站机电设备的运行状态和主要运行参数及上游水位、下游水位等进行连续监视，确认电站各设施运行在允许的工作范围内；如果发生表征设备状态异常的状态变位或参数越限，则发报警信号。

经济运行　根据电力系统的要求、上游天然来水量和水库调节能力等，实行水库经济调度、梯级电站经济运行、电站内运行机组最佳组合和机组间的负荷经济分配。

维持电力系统稳定运行　电力系统发生扰动时，电站根据电力系统安全稳定控制装置的控制策略，通过切机、切负荷、解列、调相（或抽水）运行的机组转发电等措施维持电力系统的稳定；系统频率变化时，机组自动进行一次调频；系统电压过低时，机组强行励磁。

电站运行管理自动化　自动收集、处理电站运行参数，定期制表打印；自动统计主、辅设备的运行时间、动作次数；进行事件顺序记录、事故追忆等，以便分析、处理事故；与上级调度所自动交换信息，并将相关信息发送到电站的管理信息系统（management information system，MIS）。

提高电站运行的安全性　自动控制系统具有完善的闭锁、严格的逻辑操作顺序，保证了正确控制和调节，可避免人为的误操作和误判断。对设备运行进行周密监视，及时发现异常或隐患。当发生事故时，按照“故障导向安全”的原则，把事故局限于最小范围，保障电站设备和人员的安全。

提高经济效益　水库优化管理、梯级电站联合调度和厂内经济运行，都可使机组尽可能运行在高效率区，从而提高水能利用率。统计数据表明，自动化可使水电站发电量增加2%～6%。

提高劳动生产率　使值班人员从日常的监盘、抄表、人工操作等工作中解脱出来，提高电站的科学管理水平，为实现“无人值班”（少人值守）和完全无人值班运行创造条件。

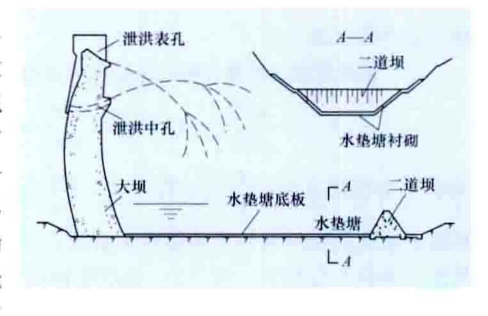
提高供电质量　水电站具有出力调节能力强、反应速度快、机组工况转换时间短的特点。大型机组可以在1～2min内从静止状态起动到并网运行，出力可在十余秒内从空载调到满载，有些抽水蓄能机组可以在一分多钟从满载抽水转到满载发电。因此，水电站自动化对维持电力系统的频率和电压水平、调节电力系统功率的余缺、维持电网连续供电起到重要的作用。

简史　早期的水电站以人工监控为主，但简易的调速器和励磁调节器作为必不可少的自动化设备，早已在水电站中得到应用。直到20世纪50年代，水电站自动化主要是用电磁式设备实现。60年代，出现了分立电子元件和固态电子组件构成的控制和调节装置。80年代，微机监控单元和可编程逻辑控制器开始用于实现单机自动化，水轮发电机组的调速器和励磁装置分别向着电气液压调速器和晶闸管励磁装置方向发展。发达国家从20世纪60年代后期起，中国从80年代起，开始采用计算机实现水电站自动化，越来越多的水电站采用计算机进行运行监视、数据处理、经济运行、制表打印，利用计算机实现了全厂的自动监控；调速器和励磁装置也已采用微机为基础的数字式调节器。进入21世纪后，新建的大中型水电站全部采用了计算机监控系统和微机型的调速器与励磁调节器，计算机也已普遍用于梯级水电站和水电站群的集中监控和水情测报。

shuidiantang

水垫塘 (plunge pool)

设于大坝下游，以二道坝壅水或开挖河床形成一定的水体，承接泄洪孔口跌落水舌，在水垫中进行消能的水工建筑物（见图）。水垫塘消能是利用淹没冲击射流的扩散作用，使入射水舌在水垫塘内实现淹没、动能扩散和水舌冲击分流过程，形成强烈的紊动掺混来消煞能量。多在深窄峡谷修建高拱坝时采用，起到防止河床冲刷和保护坝后两岸边坡不受冲刷的作用。



拱坝水垫塘示意图

布置原则　采用水垫塘消能应使多股入塘水舌在塘内落点分布合理，以提高消能效果和获得良好水流流态。为此，要本着使泄流水舌纵向分层、横向扩散、入水归槽的原则，做好泄水建筑物布置及体型的优化设计。在此基础上，对水垫塘的深度、长度、底板稳定性等作出合理的选择。

设计要求　水垫塘由开挖或修建二道坝，或两者兼用（联合）来形成。塘壁和塘底分不衬砌和全面混凝土衬砌两种，塘底衬砌有平底和反拱型。前者适用于河床岩石条件好、抗冲能力强、岸坡稳定性好、泄量不大的中小型工程。对于大型工程，由于坝高、泄流量大，泄洪功率很大，需对水垫塘进行全面衬砌防护，以增加整体抗冲能力，保护基岩中容易受到冲刷破坏的断层、裂隙、结构面等软弱部位，改善冲刷防护的监测和维护条件。由于水垫塘消能水流紊动翻滚剧烈及水流碰撞雾雨强度高，还应做好岸坡防护。

工程实例　中国二滩、小湾、拉西瓦、锦屏一级、溪洛渡等高拱坝工程，位于峡谷河段，谷坡陡峻，具有水头高、泄洪流量大、泄洪功率大的特点，其坝身泄洪均采用水垫塘消能。其中，小湾拱坝下游水垫塘为复式梯形断面钢筋混凝土衬护，二道坝高44m；拉西瓦拱坝下游水垫塘采用反拱型复式断面，底板衬砌厚3m，二道坝高40.5m。漫湾重力坝以溢流表孔泄洪为主，采用厂前大差动挑流消能，预挖水垫塘并用混凝土衬护。

shuidonglixue

水动力学

（hydrodynamics）　研究水及其他液体的运动规律及其与流场边界相互作用的学科，是流体力学的一个分支。水动力学研究的基本问题是：在给定液体的作用力、边界条件和运动起始条件下，确定液体的运动状态，及其对边界物体的作用力。在水动力学学科形成初期，主要研究忽略黏滞性的理想液体运动。在实际液体流动中，黏性阻力不容忽略，现代水动力学主要研究黏性液体运动。（见水力学）

水动力学的内容，按研究对象分为恒定总流和非恒定总流两类，按液体性质分为黏性液体和理想液体两类。

恒定总流　表述液体运动规律的基本方程是一维恒定总流的连续方程、能量方程和动量方程。

（1）恒定总流的连续方程

$$Q=vA=\text{常数} \tag{1}$$

式中 Q 为流量；v 为断面平均流速；A 为过水断面积。连续方程是液体为连续介质的前提下，物质守恒基本定律在水动力学中的表现形式。

（2）恒定总流的能量方程，即伯努利方程，其形式为

$$Z_1+\frac{p_1}{\gamma}+\frac{\alpha_1 v_1^2}{2g}=Z_2+\frac{p_2}{\gamma}+\frac{\alpha_2 v_2^2}{2g}+h_{w(1-2)} \tag{2}$$

式中 Z 为位置水头；$\frac{p}{\gamma}$ 为压强水头；$\frac{\alpha v^2}{2g}$ 为流速水头；α 为断面上流速分布不均匀的动能修正系数；$h_{w(1-2)}$ 为断面1至断面2间的水头损失。式（2）表示液体的位能、压强和动能之间的平衡与转化的关系，是能量守恒基本定律在水动力学中的表现形式。

（3）恒定总流的动量方程。常用直角坐标系中3个分量的表示式为

$$\left.\begin{aligned}\frac{\gamma Q}{g}(\alpha_2 v_{2x}-\alpha_1 v_{1x})&=\sum F_x\\ \frac{\gamma Q}{g}(\alpha_2 v_{2y}-\alpha_1 v_{1y})&=\sum F_y\\ \frac{\gamma Q}{g}(\alpha_2 v_{2z}-\alpha_1 v_{1z})&=\sum F_z\end{aligned}\right\} \tag{3}$$

式中下标1、2和 x、y、z 表示断面1或2的平均流速在直角坐标系中的分量；$\sum F_x$、$\sum F_y$、$\sum F_z$ 表示作用在断面1至断面2之间的液体上所有外力在 x、y、z 三个方向投影的代数和。动量方程表示外力与液体流动之间的关系，是牛顿定律 $\sum F=ma$ 在水动力学中的表现形式。

非恒定流总流　河渠中洪水演进及水电站引水系统中的流量变化属于非恒定流动，其连续方程和能量方程为：

（1）非恒定总流的连续方程。在无侧向入流时可写为

$$\frac{\partial Q}{\partial x}+\frac{\partial A}{\partial t}=0 \tag{4}$$

式中 x 为沿流向的坐标。该方程表示流量沿程的增加率等于过水断面随时间的减小率。

（2）非恒定总流的动量方程

$$\frac{\partial h}{\partial x}+\frac{\alpha v}{g}\times\frac{\partial v}{\partial x}+\frac{1}{g}\times\frac{\partial v}{\partial t}=S_0-S_f \tag{5}$$

式中 h 为水深；S_0 为河底比降；S_f 为摩阻比降。式（4）和式（5）即为圣维南方程组。

自然界的实际液体流多为三维不可压缩黏性液体运动，其基本方程组包括连续性方程和运动方程。

（1）连续性方程

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i}=0 \quad (i=1,2,3) \tag{6}$$

（2）运动方程，即纳维-斯托克斯方程

$$\frac{\partial u_i}{\partial t}+u_j\frac{\partial u_i}{\partial x_j}=F_i-\frac{1}{\rho}\times\frac{\partial p}{\partial x_i}+\frac{\mu}{\rho}\times\frac{\partial^2 u_i}{\partial x_i\partial x_j} \quad (i,j=1,2,3) \tag{7}$$

式中 u 为流速；F 为单位质量力；ρ 为液体密度；μ 为液体黏度；p 为动水压强。

对于理想液体，略去式（7）中的黏性项，则简化为欧拉方程

$$\frac{\partial u_i}{\partial t}+u_j\frac{\partial u_i}{\partial x_j}=F_i-\frac{1}{\rho}\times\frac{\partial p}{\partial x_i} \quad (i,j=1,2,3) \tag{8}$$

上列偏微分方程组，一般情况下难以直接求解，实际应用时常按具体情况进行各种简化。

参考书目

夏震寰．现代水力学．北京：高等教育出版社，1990.

shuigong hunningtu

水工混凝土

（concrete for hydraulic structure）　以水泥、砂石骨料、水、掺合料及外加剂按适当比例配合，经浇筑成型后，硬化为能满足水工建筑物结构要求的一种混凝土。根据其施工工艺的不同，可分为常态混凝土（见混凝土浇筑）、碾压混凝土（见碾压混凝土施工）、预应力混凝土（见预应力混凝土施工）、堆石混凝土（见堆石混凝土施工）、自密实混凝土（见自密实混凝土施工）等，表观密度在2400kg/m³左右。水工混凝土主要用于水利、水电及航道港口等工程，长年暴露于大气或深埋在水中，经受日光、温度、流水及环境水等外界因素的影响和侵蚀。因此，它除要具有混凝土的一般性能外，还要根据其所处部位的工作条件，分别满足抗压、抗渗、抗冻、抗裂（抗拉）、抗冲耐磨、抗风化和抗侵蚀等要求。例如，坝体迎水面外部混凝土有抗渗和抗冻的要求；泄水建筑物过流面混凝土要能抵抗高速水流的冲刷、空蚀和泥沙磨损；大体积混凝土要防止温度裂缝；当环境水中含有的酸、盐等有害物质超过允许值时，要求水工混凝土具有抵抗有害物质侵蚀破坏的能力等。为了满足这些要求，对水工混凝土的原材料和水工混凝土的施工，除与普通混凝土同样的一般技术要求外，还对原材料和施工有一些专门的技术要求。

对原材料的要求　包括对水泥、骨料、水、掺合料、外加剂的要求。

水泥　水工混凝土要针对其性能要求，使用不同性能的

水泥。对水泥的要求主要有：①大体积内部混凝土，宜优先选择中热硅酸盐水泥，也可选用发热量较低的硅酸盐水泥、矿渣硅酸盐水泥等；②有抗冲刷和抗冻要求的混凝土，优先采用硅酸盐水泥和普通硅酸盐水泥；③当环境水有硫酸盐侵蚀性时，应选用抗酸水泥；④当骨料中含有碱活性成分时，应采用低碱水泥；⑤建筑物外部水位变化区、溢流面和经常受水流冲刷部位的混凝土，以及受冰冻作用的混凝土，宜使用较高强度等级的水泥。

骨料　水工混凝土可选用天然骨料、人工骨料，必要时也可两者互相掺用。对骨料的要求主要有：①砂的细度模数宜控制在2.4～2.8范围内，天然砂宜按粒度分级；②粗骨料按粒径分级，根据DL/T 5144—2001《水工混凝土施工规范》的规定，分为5～20、20～40、40～80、80～150mm（或120mm）四级；③砂石骨料中含有活性骨料时，必须进行专门的试验论证；④骨料的质量要符合技术要求，对含泥量及其他有害物质含量等较普通水泥混凝土要求更严。

水　水工混凝土对水质的要求与普通混凝土相同。凡适用于饮用的水，均可用以拌制、养护混凝土。

掺合料　水工混凝土较普遍掺用的掺合料是粉煤灰，有节省水泥、改善混凝土性能的作用，品质指标一般选择粉煤灰Ⅰ级、Ⅱ级国家标准。有些水工混凝土根据其性能要求，还采用硅粉、矿渣粉等掺合料。

外加剂　水工混凝土对外加剂的主要要求是能改善混凝土的性能，提高混凝土的质量及合理降低水泥用量，其掺量通过试验确定。常用的外加剂有减水剂、加气剂、防水剂、防冻剂、缓凝剂和早强剂等。根据施工需要、混凝土性能要求及建筑物所处的环境条件选择适当的外加剂。

对施工的要求　包括正确选择混凝土的配合比，水工混凝土拌和、运输、浇筑、养护过程要求，大体积水工混凝土温度控制，低温季节施工要求等。

（1）正确选择混凝土的配合比。必须通过试验确定配合比，配合比除应满足设计要求的各项强度和耐久性要求外，还应满足施工和易性的要求，并采取措施合理降低水泥用量（见混凝土配合比）。

（2）水工混凝土在拌和、运输、浇筑、养护过程中，除具有与普通混凝土相同的质量控制要求外，有时还有一些专门的要求，如：①控制混凝土浇筑温度（混凝土经过平仓振捣后，覆盖上层混凝土前，在5～10cm深度处的温度）；②为利于混凝土浇筑块的散热，在基础和老混凝土约束部位、浇筑块高以0.75～1.5m为宜；③对混凝土浇筑的分缝尺寸、分块高度、相邻坝块的高差及浇筑间歇时间等，均应根据具体施工条件加以限制。

（3）对大体积水工混凝土，需采取混凝土温度控制措施，以防止产生温度裂缝。主要措施是减少混凝土热量，降低浇筑温度，加强浇筑块散热和表面保护等。

（4）低温季节施工时，必须有专门的施工组织设计和可靠的防寒保温措施，以保证混凝土满足设计规定的强度增长的要求。

shuigong jianzhuwu

水工建筑物

（hydraulic structure）　为开发、利用和保护水资源，减免水害而修建的受水作用的建筑物。作用在水工建筑物上的水体或静止或流动，或有侵蚀性或无侵蚀性。水工建筑物可按功能、用途、使用期限、主要建筑材料等进行分类，并按其重要性进行分级。

类型　按功能分为挡（壅）水建筑物（拦截阻挡水流、壅高水位）、泄水建筑物（有控制地安全泄放具有势能的水流）、输水建筑物以及整治防护建筑物。按用途分为发电、防洪、灌溉、供水、排沙、通航、过鱼、过木等类水工建筑物。按使用期限分为永久水工建筑物和施工或检修期使用的临时水工建筑物。永久水工建筑物按其在工程中的重要性，又可分为失事后将造成下游灾害或严重影响工程效益的主要建筑物，如坝、水电站厂房等，以及失事后不致造成下游灾害或对工程效益影响不大，并易于修复的次要建筑物，如导流墙、护岸等。按主要建筑材料分为混凝土、砌石、土石、金属、橡胶等。

特点　水工建筑物除承受自重、土（泥沙）压力、温度、地震等作用外，还承受水的各种作用，主要有静水压力、动水压力、浪压力、冰压力、渗透压力、浮托力等，其他物理和化学作用有高速水流区的空蚀、磨蚀、冲刷、水的冻融、渗流对岩土的内部冲刷和化学溶蚀，以及淤塞、侵蚀性水对建筑物的侵蚀作用等。因此，水工建筑物的特点是：

（1）水工建筑物工作条件复杂，在很大程度上受地形、地质、水文、气象等自然条件的制约，且多处于水下或水流中，损坏后不易修复，因而要因地制宜地根据具体条件加以设计，一般要求较高的可靠性。

（2）水工建筑物，如大坝、河渠等往往对自然环境和社会发展有很大的影响。

（3）常需在河、湖、海等水域中施工，需导流和排干施工基坑或在水下施工，一般工程量巨大，常需机械化施工。

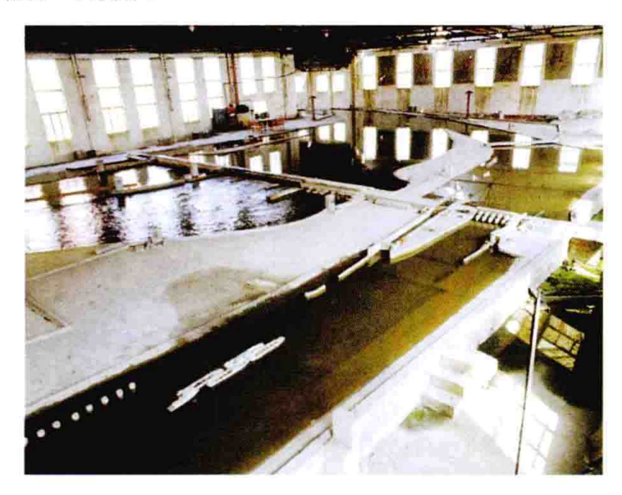
（4）水工建筑物按其重要性、级别、结构类型、运用条件等，采用一定的洪水设计标准。在规定条件下，抗御洪水的能力一般以洪水重现期表示，与海洋潮位相关的沿海地区的洪水设计标准用潮位的重现期表示。运用条件一般分为正常和非常两种。正常运用洪水采用设计洪水标准，非常运用洪水采用校核洪水标准。当出现正常运用洪水时，应能保证水工建筑物的安全或防洪设施的正常运用；当出现非常运用洪水时，在保证主要建筑物安全的前提下允许次要建筑物遭受损坏。以校核洪水标准对主要水工建筑物的安全性进行校核时，安全系数允许适当降低。

分级　水工建筑物根据其破坏可能产生的后果（危及人的生命、造成经济损失、产生社会影响等）的严重性，按其所属枢纽工程的等别、作用和重要性分为不同的级别。对不同级别的水工建筑物，有不同的要求：①抵御洪水的能力，如洪水标准、安全超高等；②强度和稳定性，如建筑物的强度和抗滑稳定安全系数、限制裂缝等；③建筑材料，如品种、质量、耐久性等；④运行可靠性，如建筑物各部分尺寸裕度大小和监测设施的选择等。中国水电工程将水工建筑物级别分为1、2、3、4、5五级。永久性水工建筑的级别高于临时性水工建筑物，主要建筑物级别高于次要建筑物级别。水工建筑物级别越高，设计安全标准也越高。混凝土坝高超过150、120m，土石坝高超过100、80m的2、3级大坝建筑物宜提高一级。

shuigong jianzhuwu moxing shiyan

水工建筑物模型试验 (model test of hydraulic structure) 根据相似准则，在按照一定比例尺缩小的实物模型上，模拟主要作用因素和边界条件，预测原型力学行为和工作性态，验证设计和计算结果的试验技术。

分类 主要分为水工水力学模型试验（见图）、水工结构模型试验和地质力学模型试验等。水工水力学模型试验主要研究水工建筑物的各类水力学问题。水工结构模型试验主要研究水工建筑物的结构应力、变形、稳定性及安全度等问题，又可分为水工结构静力模型试验和水工结构动力模型试验。地质力学模型试验研究的对象则为工程结构与周围岩体相统一的实体。



葛洲坝水利枢纽水力学整体模型试验

按模型模拟的范围，分为整体模型试验、单体模型试验和断面模型试验等。

按照模型各个方向的比例尺是否相同，又可以分为正态模型试验和变态模型试验。

为了研究一些特定的问题，水工建筑物模型试验还可以在减压箱（主要研究空蚀、空化问题）、离心机（可以按照比例模拟重力加速度）、振动台（主要进行动力模型试验）等特殊设备中进行。

发展趋势 由于计算机技术的迅速发展，数值模拟已成为一种主要的研究方法和手段，但工程中遇到的大量实际问题呈现复杂的非线性特性，数值模拟的结果受到计算简化、边界条件、本构模型，甚至控制方程等的限制，仍然需要模型试验的结果加以验证和补充。另外，随着计算机、量测、原型监测、试验设备和材料等技术的进步，模型试验的方法、手段不断得到发展，为解决工程问题和深化科学认识提供了重要手段。模型试验正朝着大比例尺、智能化、多维化、可视化、精细化方向发展，在水电工程研究中仍然具有重要地位。广泛开展的工程安全监测、现场试验、水力学原型观测等1∶1的试验，获得的原型工程在各种荷载作用下的真实性态观测数据也为提高模型试验手段、消除模型比例尺效应等提供了重要的技术支撑。

参考书目

中国水利水电科学研究院，南京水利科学研究院．水工模型试验．2版．北京：中国水利水电出版社，1985.

shuigong jiegou dongli moxing shiyan

水工结构动力模型试验 (dynamic model test of hydraulic structure) 采用缩尺物理模型模拟实际工程结构，必要时还包括适当范围的基础及水体，测定模型在动态激励或静动荷载综合作用下的各种物理响应的实验技术。试验内容和目的包括：①各种状态下的动力特性和地震响应；②抗震薄弱部位确认；③动态损伤破坏机理研究；④设计地震作用下的安全性评价及极限抗震能力研究；⑤验证抗震措施的有效性；⑥校验数值模拟成果的合理性。

试验设备 主要包括动力加载设备和动力响应测量系统。

动力加载设备主要有地震模拟振动台、离心机振动台、激振器等。地震模拟振动台适合于常规条件下的动力模型试验，可提供白噪声、正弦扫频、任意规则波、实测地震波或人工地震波等各种动态激励。大型振动台采用电液伺服系统和计算机数字控制，可模拟地震时实际地面运动的三向六自由度振动，其特点是模型尺寸较大、模拟的精细度较高，主要用于混凝土重力坝、拱坝等的试验研究。离心机振动台通过提高模型的应力水平，使模型的应力达到或接近原型水平，是等应力的试验方法，其特点是模型可直接采用原型材料，相似性好，主要用于土石坝等动力特性的试验研究。激振器加振适用于地震惯性力作用位置较为明确的结构动力模型试验，也包括针对结构局部特性的拟动力试验。

动力响应测量包括速度、加速度、位移、应变、动水压力、孔隙水压力等反应。测量系统通常由传感器、适配器、计算机采集软硬件等组成。测量信号通过放大、滤波等装置后，由计算机采集或直接由示波器或磁带式等记录器记录，再进行分析处理。

发展趋势 数值分析理论与方法发展迅速，通过数值模型已能分析结构的地震响应，但由于材料本身及其结构动力响应过程十分复杂，数值模型中引入了多种近似假定，特别是结构动态损伤破坏等非线性特征的数学模型和求解方法都处于探索阶段，因此，结构地震响应仍需通过物理模型试验及数值模型分析两种手段，不断研究、改进并相互验证。结构动力模型试验仍是水工结构抗震研究的重要手段和途径。

电子和计算机技术的飞速发展，大大提高了动力加载设备的规模、控制精度、系统稳定性，以及动态测量系统的测试精度、信噪比水平和数据处理效率，同时，更加完善的模型设计理论、模型制作手段和新型模型材料的研发为满足模型相似要求、全面评价结构抗震性能、探索损伤破坏机理等创造了条件。

世界上最大的地震模拟振动台和离心机振动台均建于日本，其中，最大的地震模拟振动台台面尺寸达15m×20m，载重量1200t，最大加速度1.5g，最高工作频率18Hz；最大的离心机振动台台面尺寸为2.2m×1.07m，振动质量3t，振动加速度50g，可以开展百米级土石坝的全等应力模拟。中国已建成一批具有一定规模的地震模拟振动台和离心机振动台，其中水电行业中具有代表性地震模拟振动台台面尺寸为5m×5m，载重量20t，台面最大加速度为1.0g，最高工作频率可达120Hz，适合进行缩尺较大的混凝土坝动力模型试验。

shuigong jiegou jingli moxing shiyan

水工结构静力模型试验 （static model test of hydraulic structure） 用结构模型研究水工结构在静力荷载作用下的应力、变形和安全度的实验技术。静力荷载包括建筑物自重、水压力、泥沙压力、温度荷载等，是作用于水工结构上的主要荷载。一些动力荷载，如地震惯性力也可用拟静力法按静力荷载近似考虑。因此，水工结构静力模型试验是一种基本的试验方法。

根据不同的研究对象和试验目的，可采用脆性材料和光弹性两种结构模型试验方法。脆性材料水工结构模型试验可用于研究混凝土结构的应力状态及破坏过程。光弹性水工结构模型试验是采用光弹性材料模拟结构，可用于研究结构的弹性应力状态。研究某些特别复杂问题时，可采用几种试验方法相互配合，也包括物理模型和数学模型相结合的研究方法。

水工结构静力模型试验一般采用正态模型，即在三维空间里完全几何相似。但在特殊情况下，有时也采用变态模型。

在确定模型范围时，要注意适当模拟一定范围的地基，并选择适当的加荷方法。在不影响试验精度的前提下，确定模型具体结构及尺寸时可作合理的简化。20世纪60年代以来，还发展了模拟复杂地基的技术，又称地质力学模型试验。

水工结构静力模型试验的量测技术除传统的电阻应变计及其他电测传感器或光测等方法以外，一些基于高精度视频和图像处理技术、电磁感应技术等非接触测量手段也迅速发展。

脆性材料水工结构模型试验 用与原型材料相似的脆性材料制成结构模型，研究其应力、变形和安全度的实验技术。在水电工程中常用的混凝土、石料及各类围岩多属脆性材料，通常用石膏类、石膏硅藻土混合材料类或混凝土（包括水泥浮石混凝土和微粒混凝土等）类脆性材料，按照相似理论制作模型；对于水工钢筋混凝土结构，也可采用铁丝等材料模拟钢筋的作用。用电阻应变计及其他电测传感器或光测、机测方法，量测其受荷载后的应力、应变及位移等物理量，以研究结构物及其地基的应力、变形、稳定性及破坏等性态。它既可用于线弹性问题的研究，也可进行破坏试验。特别适用于拱坝、重力坝等大型水工建筑物的试验研究，也可用于渡槽、蜗壳、地下洞室、升船机塔柱等结构物的试验研究。

荷载作用：模拟的荷载主要有坝体自重、静水压力、泥沙压力、扬压力、温度荷载等。施加荷载有多种方法，如就静水压力而言，可用千斤顶加荷系统以及不同密度液体（包括水、水银等）的液压、气压等各种方式施加荷载。

试验程序：①选择合适的模型材料，按一定相似准则来设计和制作模型；②在模型上布置测点，粘贴电阻应变片或其他测试应力和位移的仪表；③施加预定的荷载后，用电阻应变仪或其他接收设备测试其应变及位移；④根据应力-应变关系计算各点的应力值，包括正应力、剪应力、主应力及其方向等，分析结构物的应力状态，评价其安全性和经济性。

破坏模型试验应满足的相似条件有：①原型与模型相应点的应变相等；②原型与模型材料强度相似；③原型和模型材料应力-应变关系相似。可以通过超载或降强，或两者结合，对结构的破坏过程进行模拟，以了解水工结构的破坏形态和破坏机理。通过破坏模型试验，了解结构本身的极限承载能力或安全度，并能直观地看到破坏的发生和发展过程，从而找出结构的薄弱环节，为改善结构设计提供依据。但是，由于试验条件的限制，完全满足这些相似条件存在很大的困难，一般破坏模型试验仅能够满足部分相似条件，其提供的破坏试验成果仅为结构实际极限承载能力提供参考。

超载安全系数：在结构破坏模型试验中，定义超载安全系数 K。其表达式为 $K=P'/P$。式中 P' 为结构破坏时承受的总外荷载；P 为结构承受的总设计荷载。

光弹性水工结构模型试验 利用偏振光场中的环氧树脂等光弹性材料在荷载作用下产生的暂时双折射效应，对结构模型的应力场进行模拟的一种试验方法。20世纪初，在桥梁结构中开始初步应用了光弹性结构模型试验，40年代以后，在水工结构模型中逐步得到应用。光弹性试验适合对几何尺寸和荷载条件复杂的水工结构进行研究，但随着有限元等数值分析方法的快速发展，水工结构的光弹性试验已很少进行。

简史 20世纪初，美国、欧洲就采用橡胶、石膏硅藻土等材料进行大坝的结构静力模型试验，特别是欧洲的双曲拱坝设计，早期更是依赖于结构静力模型试验的成果。1945年，法国率先开展了一个高3m、长9m、厚20cm的小拱坝模型的结构破坏试验。接着意大利、葡萄牙等国相继开展了室内水工结构破坏模型试验。中国自20世纪50年代末60年代初开始进行这类试验，主要的高坝，特别是拱坝，多进行包括坝基在内的水工结构静力模型试验，以便与计算分析的成果相互验证，为工程设计提供依据。随着材料和测试技术的进步以及各种结构面模拟手段的发展，还出现了模拟强度变化、渗透压力等的新型试验手段。水工结构静力模型试验已经成为水工结构设计的重要技术手段。

参考书目

陈兴华，等．脆性材料结构模型试验．北京：水利电力出版社，1984.

shuigong jiegou kangzhen

水工结构抗震 （seismic resistance of hydraulic structure） 以防止和减轻水工建筑物遭遇破坏，避免引发次生灾害为目的的相关技术和实践，其目标是在不同的地震设防水准下，各类水工结构能满足相应的抗震性能要求。主要内容包括：设防标准确定、地震动参数选择、结构地震响应分析、抗震安全评价和结构抗震措施。

设防标准确定 水工结构抗震一般遵循“分类设防”的基本原则，按各类水工建筑物的重要性、失事可能导致的危害性和场地基本烈度划分工程抗震设防类别，确定其设防标准。中国水工建筑物抗震设防标准：一般情况下设计地震烈度取场地基本烈度，地震动加速度代表值的概率水准为基准期50年内超越概率为0.1；对于抗震设防类别为甲类的水工建筑物，其设计地震烈度在场地基本烈度基础上提高1度。地震动加速度代表值的概率水准，对壅水建筑物，取

100年内超越概率为0.02；对非壅水建筑物，取50年内超越概率为0.05。抗震设防目标是在设计地震作用下满足可修复的要求。

2008年汶川地震后，抗震设防增加了校核地震工况，对于1级挡水建筑物，取100年内超越概率为0.01或最大可信地震，相应抗震设防目标为不溃坝，避免发生严重次生灾害。

地震动参数选择 由地震引起的岩土运动的强弱多以峰值加速度、反应谱和持续时间等表示，并作为结构抗震设计的主要参数。其中，峰值加速度值越高，表明地震动越强。反应谱的形状和有关参数主要与场地类别和地震震中距离远近有关，中国水工结构抗震分析中采用的标准设计反应谱是基于大量国外和少量中国强震记录生成的。对重大工程，通常还需提供与工程场地相关的设计反应谱，但由于其中长周期成分的反应谱值偏大，未能推广应用。一般情况下，地震动的持续时间越长，对地面建筑物的破坏越大。

结构地震响应分析 主要有数值计算和动力试验两种方法。

数值计算 结构地震响应分析的主要手段。按结构反应的属性划分，可分为线弹性分析和非线性分析；按地震作用及结构动力反应求解方法划分，可分为拟静力法和动力法；按结构模拟方式划分，可分为材料力学法和弹性力学法（有限单元法）。

混凝土坝主要采用线弹性分析方法，其中重力坝以材料力学法为基本分析方法，拱坝以拱梁分载法为基本分析方法。动力法多采用基于振型分解法的反应谱法，对于重要的水工结构，还需采用时程分析法。

土石坝一般采用拟静力法进行抗震稳定分析。对于设计烈度为8、9度的70m以上的土石坝，或地基中存在可液化土时，应同时进行基于有限元法的动力分析，综合评价其抗震安全性。

水工建筑物与地基动力相互作用是抗震分析中的重要因素，模拟无限地基的辐射阻尼效应、消除地震波在人工截断边界处的反射非常重要。该领域开展了大量研究，提出了黏弹性人工边界、多次透射人工边界等多种计算模型。成果表明，与无质量地基相比，辐射阻尼效应可显著降低大坝动力响应。

此外，水工结构动力非线性理论研究和数值模型得到迅速发展，其中考虑水工结构接触非线性（混凝土坝的横缝和纵缝、基岩中的软弱结构面等）的计算分析理论和方法相对成熟，已在水工结构抗震中得到应用。

动力试验 结构地震响应分析的辅助手段。对于抗震设防类别为甲类、设防烈度为8度及以上的水工建筑物，在数值计算的基础上可开展动力试验，以验证计算分析的合理性和抗震措施的有效性。

抗震安全评价 水工建筑物抗震强度和稳定应满足承载能力分项系数极限状态设计表达式，具体表达式为

$$\gamma_0 \psi S\ (\gamma_G G_k,\ \gamma_Q Q_k,\ \gamma_E E_k) \leqslant \frac{1}{\gamma_d} R\left(\frac{f_k}{\gamma_m},\ a_k\right)$$

式中 γ_0 为结构重要性系数；ψ 为设计状况系数，可取0.85；S（·）为结构作用效应函数；γ_G 为永久作用分项系数；G_k 为永久作用标准值；γ_Q 为可变作用分项系数；Q_k 为可变作用标准值；γ_E 为地震作用分项系数，取1.0；E_k 为地震作用标准值；γ_d 为承载能力极限状态结构系数；R（·）为结构抗力函数；f_k 为材料性能标准值；γ_m 为材料性能分项系数；a_k 为几何参数标准值。

水工建筑物动态结构抗力是以各自设防目标所对应的材料抗力来体现的，如混凝土的动态抗压、抗拉强度，坝肩滑裂面、坝基建基面动态抗剪断强度等。其中，各类接触面的动态抗剪断强度可取其静态值，而混凝土的动态强度可较静态值提高20%。一些高拱坝进行的全级配大坝混凝土试验及细观力学计算成果表明，混凝土动态强度提高的幅度略有偏大。

对于处于高地震烈度区、特别重要、失事后可能产生严重次生灾害的壅水建筑物，应分析评价其极限抗震能力和地震破坏模式。

结构抗震措施 按照系统安全的理念，针对各自结构和地震响应特点及抗震薄弱环节，采用多层次的设防水准，满足相应极限状态和设防目标的要求，提高水工建筑物的整体抗震能力。

（1）重力坝：①避免坝坡突变，顶部折坡宜圆弧化，坝顶不宜过于偏向上游；②减轻坝体上部重量，提高上部混凝土强度等级或适当配筋；③加强溢流坝段顶部交通桥的连接，并增加闸墩侧向刚度；④适当提高底部混凝土强度等级，必要时在上游坝踵部位适当铺设黏土铺盖；⑤坝体孔口周边、溢流坝闸墩与堰面交接处等抗震薄弱部位应加强配筋。

（2）拱坝：①合理选择坝体体型，改善拱座推力方向，减小在地震作用下坝体中上部及接近坝基部分的拉应力区；②适当减小双曲拱坝向上游的倒悬度，其顶部拱冠部分宜适当倾向下游；③加强坝体分缝的构造措施，改进止水片的形状及材料，以适应地震时接缝多次反复开合的特点，必要时采取坝体顶部布设减振阻尼器、坝体上部布设跨缝钢筋等抗震措施；④拱坝下游面中部受拉区及拉应力较大部位，采取适当提高坝体混凝土强度等级、适当布置坝面抗震钢筋、减轻顶部重量并加强其刚度；⑤在上游坝踵部位适当铺设黏土铺盖。

（3）土石坝：①宜采用直线或向上游弯曲的坝轴线，防渗体不宜采用刚性心墙的形式；②加宽坝顶，放缓上部坝坡，坡脚可采取铺盖或压重措施，上部坝坡可采用浆砌块石护坡，并可采用钢筋、土工合成材料或混凝土框架等加固措施；③加强土石坝防渗体坝体顶部、坝体与岸坡或混凝土等结构的连接；④加强防渗体上、下游面反滤层和过渡层，且必须压实并适当加厚；⑤选用抗震性能和渗透稳定性较好且级配良好的土石料筑坝，均匀的中砂、细砂、粉砂及粉土不宜作为地震区筑坝材料；⑥对于面板堆石坝，应加强面板上部的配筋。

shuigong jiegou moxing shiyan

水工结构模型试验 (hydraulic structural model test)

根据相似准则，在按一定比尺的模型上模拟原型水工结构的力学现象，以研究水工结构的应力、变形和安全度的实验分析技术。通过水工结构模型试验，将模型中测得的物理量，再按相似关系换算为原型的对应量值，可以了解原型结

构的特性。水工结构模型试验可以同时考虑多种因素和复杂的边界条件，不仅能研究水工结构在荷载作用下弹性阶段的应力和变形问题，而且可以研究超载情况下的破坏发展过程和破坏形态，给人以直观的印象，在一些重要的水工结构（如拱坝、复杂地基上的重力坝、垂直升船机的塔柱结构、预应力闸墩等）的设计和研究中，得到广泛应用，并和计算分析方法相辅相成，互为补充。结构模型试验也可为验证和改进设计理论和计算方法提供依据。

类型　通常可按作用荷载的特性、荷载作用阶段、模型范围和受力状态以及模型材料的不同进行分类。

（1）按作用荷载的特性，可分为水工结构静力模型试验和水工结构动力模型试验。

（2）按荷载作用阶段，可分为线弹性模型试验和破坏模型试验。随着结构计算分析技术的发展，线弹性模型试验已逐步减少。

（3）按模型范围和受力状态，可分为整体模型、单体模型和断面模型 3 种类型。①整体模型多用于研究空间结构，如拱坝、地下洞室等；②单体模型用于研究独立坝段或局部结构，如大头坝、重力坝岸坡坝段等；③断面模型用于研究重力坝、空腹重力坝、隧洞、拱圈等平面问题。断面模型又分为应变和应力两类。

（4）按模型材料不同，可分为脆性材料水工结构模型试验、地质力学模型试验、光弹性水工结构模型试验等。

量测技术　在静力结构模型试验中，主要测试的物理量是应力和位移，而动力试验中，主要测试结构物的自振特性及动力响应。测试方法有电学、光学、声学和机械等方法。

简史　20 世纪初期，美国 J. S. 威尔逊（J. S. Wilson）开始用橡胶制作重力坝断面结构模型。1930 年，美国垦务局用石膏硅藻土制作了当时世界上最高的胡佛（Hoover）坝的三维结构模型，并进行了试验。第二次世界大战结束后，在世界范围内大量兴建混凝土坝，因而在 20 世纪五六十年代水工结构模型试验发展比较迅速，有些工程甚至将它作为设计的唯一手段。中国从 50 年代开始开展结构模型试验工作，80 年代以来进入发展的新阶段，特别是近 10 年来，除进行脆性材料水工结构模型试验研究外，还完成了大量的地质力学模型试验研究。在试验技术方面，地质力学模型得到了发展，出现了全息干涉、激光散斑干涉等多种光测技术，数据的采集和处理也都实现了自动化。结构模型试验的主要不足是试验周期长，工作量大，费用较高，技术难度也较大。

参考书目

Sabnis G M, et al. Structural Modeling and Experimental Techniques. New York: Prentice Hall, Inc., 1983.

左东启，等. 模型试验的理论和方法. 北京：水利电力出版社，1984.

shuigong jinshu jiegou weixiu

水工金属结构维修

(maintenance of hydraulic metal structure)　保证水工金属结构安全可靠运行和正常使用寿命的工程措施。水工金属结构维修包括日常维护、探伤检查、防腐处理和破坏部件修复等。

日常维护　按照水电站水工金属结构维护规程进行日常巡视观测检查，发现问题立即处理。巡视观测的主要内容包括：经常浸在水中的闸门及其设备运行及变化情况；在动水中操作闸门时产生的振动现象是否正常；受外界严寒空气作用的焊接结构是否有裂缝出现；需要在冰冻期间操作的闸门是否采取保温或加热措施；用于起吊的钢丝绳是否发生锈蚀、断股等情况。

日常维护包括定期对设备的清扫、检查、防腐处理，润滑油脂补充，变质油脂更换，对钢丝绳表面涂油，易损部件及设备进行更换处理等。

探伤检查　金属结构的组合方式有螺纹连接、铆接与焊接等，常用方法是焊接，如闸门的门叶、压力钢管的拼接等。焊接的焊缝质量存在质量问题（包括夹渣、孔隙、裂缝等），将影响安全运行。焊缝质量常用无损探伤的方法进行检测。无损探伤方法有多种，水工金属结构一般多采用射线探伤或超声波探伤进行检测。

防腐处理　由于金属结构布置在户外、水下，特别是处在水面变化范围的部分，工作条件差，易产生锈蚀。金属结构出现锈蚀的原因，主要是结构本身的电化学性能不均匀、日光照射、高速水流冲刷、风浪冲击以及水中漂浮物、泥沙及冰凌对构件表面的磨损等综合作用影响，从而使构件原有防腐层受到损坏。针对引起腐蚀的原因，可以采用涂料防腐、金属喷镀防护层，以及外加电流阴极保护等方法进行防护。

涂料防腐　在进行涂料防腐前必须彻底清除金属表面的铁锈，一般使用石英砂进行机械喷砂除锈，使构件露出光亮的金属本色，并且表面粗糙，以使涂料能与母材充分牢固地结合。涂层有坚实的附着力，提高了防腐的效果。各地区金属结构所接触的水质以及其他影响条件的不同，应按具体条件采用与之相适应的涂料。所采用涂料应不含活性溶剂、无毒、无污染。如果在构件除锈以后，先进行一次磷化处理再刷涂料，可增强涂料对母材的附着力，延长涂料的使用寿命。

金属喷镀保护层　进行金属喷镀前，要彻底清除金属构件表层的锈蚀，喷镀保护层可起隔水作用，并起牺牲阳极的阴极保护作用。金属喷镀材料可以是锌或铝，一般多采用锌，因为金属锌与钢铁有良好的电连接，当其处在同一电介质中时，由于锌的电化学活动性比铁活泼，溶解于水（即牺牲）的电子向附近基体移动，距锌一定距离处，电子聚集到一定程度，构件钢铁成为整体阴极而得到保护，锌则作为阳极而消耗。采用锌喷镀后的外层仍可采用涂料进一步增加其保护作用。

外加电流阴极保护　根据化学腐蚀原理，采取外加直流电源，正极通入专用的辅助阳极，负极连接金属构件，即可形成阴极保护系统。通过调节保护电流，可以使构件上的许多腐蚀原电池的腐蚀电流抵消，使构件成为一个整体阴极而得到完全的保护，达到防止腐蚀的目的。采用外加电流阴极保护与涂料联合保护，可以使涂料不易受破坏，并可使电流保护降到较低值，达到经济与长效的目的。

破坏部件修复　包括对水工金属结构部件的损坏件的修复和加固。

损坏件修复　修复时必须参照原设计进行，倘若认为原来的设计存在问题，并且是造成设备损坏的原因需要修改原有设计时，应先提出修改方案，经过审批后方可实施。对易磨易损部件，应按照原设计配置备件，以供维修中发现损坏时及时更换。

水工金属结构部件加固　主要用于门叶、埋件、启闭设备加固。加固方法有加焊钢结构加固法、粘钢加固法等。粘钢加固法是采用黏结剂把钢板粘贴在构件外部的一种加固方法。

参考书目

谭界雄，高大水，周和清，等．水库大坝加固技术．北京：中国水利水电出版社，2011.

shuigong shuilixue moxing shiyan

水工水力学模型试验

(hydraulic model test)　按比尺缩小的模型中复演与原型相似的水流，进行水工建筑物各种水力学问题研究的实验技术。水工水力学模型试验的基础是相似理论，在制作天然河道或各种水工建筑物的水力学模型时，要遵循水力相似准则。这些相似准则一般有重力相似、黏滞力相似、弹性力相似、表面张力相似、压力相似等，以表述重力相似准则的弗劳德（Froude）定律最为常用。此外还有空化水流、温差异重流、泥沙冲淤等特殊情况的相似准则。鉴于模型水流不能同时满足原型各种作用力的相似条件，因此在将模型试验数据推算到原型时，需要在模型设计及模型试验成果分析时考虑缩尺效应。通过模型试验，可进行工程布置方案的比较，建筑物过流表面的体型优化，下游消能防冲等问题的研究，并进一步发展水力学理论。

模型试验的类型　通常按模型的范围、模型水平比尺和垂直比尺是否相同、模型水流是否含沙、模型水面所受气压的大小、河床水流边界是否固定进行分类。

（1）按模型的范围分，有整体模型、单体模型和断面模型。整体模型模拟整个水电枢纽及其上、下游一定范围河段的河床、水流和泥沙，主要应用于水电枢纽布置和泄水、冲沙及通航等建筑物的设计和优化。单体模型模拟单项水工建筑物的水流，主要应用于各类泄水建筑物、水电站进水口、输水建筑物和过鱼建筑物等的体型布置、过流能力、水流条件、消能效率等的试验，调压室波动试验，压力管道的水击模型试验等。断面模型模拟水工建筑物的一部分水流，可在透明水槽或水管中进行试验。主要应用于过流边界压力及脉动压力试验、二元水跃消能防冲试验等。

（2）按模型水平比尺和垂直比尺是否相同，分为正态模型和变态模型。正态模型的水平和垂直比尺相同，为多数水工水力学模型试验所采用。变态模型的水平和垂直比尺不同，以保持大范围水力学模型中有一定水深，主要用于河道或港湾的模型试验。水平和垂直比尺之比称为变率，一般在1∶2～1∶10之间，如相差过大就可能改变模型中水流的流态、流速和压强分布。

（3）按模型水流是否含沙，分为清水模型和浑水模型，后者又称泥沙模型试验，可应用于河道、水库、沉沙池、上下游引航道的泥沙冲淤试验。

（4）按模型水面所受气压的大小，分为常压模型试验和减压模型试验。常压模型试验的模型水面所受的气压为大气压力，适用于多数水工模型试验。减压模型试验的模型水面所受的气压大小按模型比尺缩小，并将模型放置在减压箱内进行试验，适用于空化试验。

（5）按河床水流边界是否固定，分为定床模型试验和动床模型试验。定床模型试验中的水流边界固定，不受水流冲淤的影响，而动床模型试验中河床的水流边界由可冲刷材料组成，以研究河床及泄水建筑物下游地形的冲淤变化。

试验方法及程序　包括模型设计和制作、测试系统布置、预试验、试验研究、整理分析等。

（1）模型设计和制作。按试验任务和大纲要求选定模型的类型和比尺，进行场地配置，设计、制作和安装模型。模型制作的材料可根据试验精度要求、范围大小、加工难易和成本高低等予以选择。

（2）测试系统布置。按照模型试验要求，在预定区域或断面上布置测点，设置量测水位、流速、流量、压强、流态、地形的仪器设备，并取得原始测读数据。

（3）预试验。用已有资料验证模型中水流是否与原型相似，必要时对模型进行修正，如进行河道模型试验时，要对河床糙率的取值按实测资料验证，以保证其相似性。

（4）试验研究。一般先进行原设计方案的试验，观察水流流态，量测各项水力要素。针对原布置方案存在的问题，借鉴已有工程经验及科研成果，对模型进行修改，逐步优化。最后对选定方案进行总结试验。

（5）整理分析。整理分析试验资料，编写试验研究报告，提出相应的建议。

试验设备及仪器　包括试验场所、供水系统、专用设备和测量仪器等。

（1）试验场所。主要有：①室内试验厅，一般为综合试验大厅，可布置几个模型同时进行试验；②室外试验场，需要较大的试验流量及场地的模型试验，多用于河工、港工及大型水电枢纽的整体模型试验；③工程现场试验场所，可利用工程现场大流量、高水头等有利条件进行高速水流问题试验研究。

（2）供水系统。有自流式和循环式两种，室内试验厅和室外试验场，大多采用循环式系统。①自流式供水系统利用闸、坝、瀑布及渠道的水位落差引水至试验室，试验后的尾水不再重复利用；②循环式供水系统包括蓄水池、供水设备、平水设施、量水设备和回水设备，安装控制阀门，便于水量调度，保证进流稳定。

（3）专用设备。包括：①试验水槽，如进行二维水流试验的玻璃水槽，进行波浪试验的波浪水槽等；②活动水槽，即底坡可以变动的水槽，用以研究糙率、推移质、高速水流掺气等问题；③高水箱，用于进行泄洪洞、坝身深孔进水口及深水闸门水力学特性、掺气减蚀及振动等的试验研究；④减压箱、循环水洞、文丘里管等。

（4）量测仪器。有测针、测压管、测压计、毕托管、文丘里流量计、量水堰、自动水位仪、压力自动巡回检测仪、电磁流量计、测速仪（光电式、旋桨式、热线热膜式、激光式）、多普勒流速仪、粒子成像测速法（particle image velocimetry，PIV）测速仪、水下地形测量仪（电阻式、光电式及超声波式）、脉动压力传感器、掺气浓度仪、振动加速度仪、位移计等。多数仪器要经过率定，保证试验所要求的精度。一般采用计算机对量测数据进行自动采集并分析处理。

简史　1885年O. 雷诺（O. Reynolds）利用重力相似准

则进行了河口潮汐模型试验。1898年H. 恩格斯（H. Engels）在德国建立了世界上第一座水工试验室，进行了河道模型试验。20世纪以来，各国建立了许多著名的水工试验室，如法国的夏都（Chatou）国家水力学试验室、荷兰的三角洲研究院（Deltares）、美国的陆军工程师兵团水道实验站（WES）、苏联的全苏水工研究院（All-Union Scientific Research Institute of Hydrometallurgy）等。中国第一座水工试验所于1935年在天津建成，同年筹建了南京中央水工实验所。1949年以后，中国各大科研院所、流域机构、水利水电勘测设计院、高等院校都相继建立了水工试验室。中国水利水电科学研究院、南京水利科学研究院等国家级水利科学研究中心和其他水工试验室总数已达50余个。

参考书目

中国水利水电科学研究院，南京水利科学研究院．水工模型试验．2版．北京：中国水利水电出版社，1985.

shuihuanjing yingxiang

水环境影响 (impact on water environmental)

水电站建设和运行过程中对上下游及周边水体产生的物理、化学作用。水环境影响一般包括水文情势影响、水温影响、水质影响等。

水文情势影响 水电站建设和运行造成坝址上下游天然河流的水文要素发生变化。

水位、流量、流速等水文要素是反映天然河流生态系统基本特征的主要指标。水电站工程筑坝拦蓄江河径流或筑堤（坝）跨河段、跨流域引水发电或抽取江河径流至蓄水湖（库）发电对天然河流的水位、流量、流速等水文要素将产生明显的影响。

水位变化 水库调度运行使水库水位和大坝下游河段水位发生与天然情况不同的改变。大坝下游河段水位的变化趋势与流量变化基本相同。

流量变化 水电站坝址下游的流量受不同调节方式调控而变化。径流式电站、引水式电站基本不会改变电站尾水下游流量；具有日调节性能的电站会改变电站尾水下游日内流量分布；具有季调节性能的电站会改变电站尾水下游雨季、旱季的流量分布，也可以改变电站尾水下游日内流量分布；具有年调节性能的电站会改变电站尾水下游年内流量分布，也可以改变电站尾水下游日内流量分布；具有多年调节性能的电站会改变电站尾水下游年际、年内流量分布，也可以改变电站尾水下游日内流量分布。

流速变化 水库修建带来库区河段和大坝下游河段河流流速明显变化。在大坝上游不同库段，流速的变化不同。一般越靠近库尾，流速越接近天然河道；越接近坝前，流速越小。大坝下游河段流速的变化趋势与流量变化基本相同。

水温影响 水电站水库的建设和运行改变水库库区的水域面积、水深及水体流动状态，使表层和库底水体受日照和气温等的影响程度不同以及垂向水体热交换程度发生改变，从而使库区垂向水温呈不均匀分布。受入流水温、气象条件的周期性变化影响，水库水温在一年内呈周期性循环变化。水库建设将影响库区水温和下泄水温。

库区水温变化 库区水体受太阳辐射热、水库规模和形态、入库水量及水温、取水口的位置及水库调度运行等方面的影响，水库水体呈现不同的分层形态。水库水温按垂向结构形式可分为混合型、分层型和过渡型。

（1）混合型。库内不同水库的温度分布都比较均匀，水温梯度较小，库底水温随库表的水温而变化，水体与库底之间有明显的热量交换。水库较浅、调节能力低的水库和入流流量较大，库容相对较小的水库多属于这一类型。

（2）分层型。在水库水温的升温期，库表面水温明显高于中下层水温，出现温度分层，在水面以下某一部位存在水温剧变的温跃层，库底水温的年内温差一般很小。调节能力较大的水库多属于这一类型。

（3）过渡型。有些水库的水温结构同时兼有混合型和分层型两种水温分布的特征。

下泄水温变化 混合型水库的下泄水温与原天然水温相比变化很小。分层型水库垂向上存在水温分层现象，使下泄水温与原天然河流水温相比较有一定的变化，在年内升温季节的某些月份，月平均水温较建坝前有不同程度的降低；在年内降温季节的某些月份，水温则较建坝前有不同程度的升高。

水质影响 水力发电本身不会改变江河地表水质，但水库运行会改变天然河流水文情势，相应改变水体对污染物的稀释、扩散规律，提高或降低水体纳污能力和自净能力，从而间接对水质产生一定的影响。

水电站建设施工期产生的生产、生活废污水如果直接排放会影响地表水水质，按照相关规定需处理后达标排放或回收循环利用。

shuijinglixue

水静力学 (hydrostatics)

研究水及其他液体在静止（或相对静止）状态下的压强平衡规律及其应用的学科。主要研究内容包括静水压强的分布规律、作用在平面和曲面上的总压力以及浮体和潜体的平衡和稳定性等。

静水压强的分布 当作用在微小面积 ΔA 上的压力为 ΔP 时，静水压强 p 定义为

$$p=\lim_{\Delta A\to 0}\frac{\Delta P}{\Delta A}$$

静止液体中任意点沿各个方向的压强都相等。以完全真空为计算基准的称为绝对压强，以当地大气压为计算基准的称为相对压强。压强的度量单位为 N/m^2，过去也常用液柱高度表示（如米水柱、毫米水银柱）等。

静止液体在重力作用下的压强分布用下式计算

$$p=p_0+\gamma h$$

式中 p_0 为液面的压强；p 为液面下深度为 h 的点压强；γ 为液体的重度（单位体积液体的重力）。当液面压强为大气压时，γh 即为相对压强值。

液体的平衡微分方程 当作用于液体的质量力不仅是重力时，以直角坐标系表示为

$$\left.\begin{aligned}\frac{1}{\rho}\times\frac{\partial p}{\partial x}-X=0\\ \frac{1}{\rho}\times\frac{\partial p}{\partial y}-Y=0\\ \frac{1}{\rho}\times\frac{\partial p}{\partial z}-Z=0\end{aligned}\right\}\qquad(1)$$

式中 X、Y、Z 分别为单位质量液体所受各质量力的合力沿 x、y、z 三个方向的分量；ρ 为液体的密度。

静水总压力　通常分平面上总压力和曲面上总压力两种。

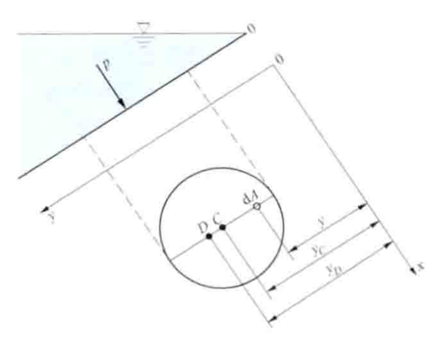


图 1　平面静水压力示意图

(1) 平面上的静水总压力。其值为 $p=p_C A$，p_C 为平面面积 A 的形心 C 点的静水压强，总压力的方向垂直于平面，其作用线与平面的交点 D 称为压力中心，D 点在 C 点之下，D 点的位置可按下式计算（见图 1）

$$y_D=\frac{I_{xx}}{y_C A}=y_C+\frac{I_{xC}}{y_C A} \tag{2}$$

其中

$$I_{xx}=\int A y^2 \mathrm{d}A$$

式中 y_D 为 D 点沿 y 轴方向的坐标；y_C 为 C 点沿 y 轴方向的坐标；I_{xx} 为面积 A 对 x 轴的惯性矩；I_{xC} 为面积 A 对通过形心且平行于 x 轴的惯性矩。

(2) 曲面上的静水总压力。工程中常见的是二向曲面。通常将二向曲面总压力 p 分解成水平分力 p_x 和垂向分力 p_z 计算（见图 2）。水平分力 $p_x=\gamma h_C A_x$，即等于作用在该曲面的垂向投影面上的静水总压力。垂向分力 $p_z=\gamma V_D$，即等于压力体内的水重，压力体 V_p 是指曲面本身以及它在水面（或水面的延长面）的投影之间的铅垂柱体，如图 2 中阴影线部分所示。

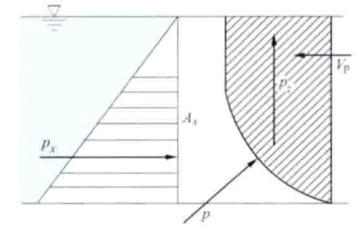


图 2　曲面静水压力示意图

浮力　物体部分或全部浸没于液体中时所受液体向上的作用力。浮力的大小等于物体排开的那部分体积的液体重量，这就是著名的阿基米德原理。

参考书目

夏震寰．现代水力学．北京：高等教育出版社，1990．

Shuikou Shuidianzhan

水口水电站

（Shuikou Hydropower Station）　位于中国福建省闽清县境内闽江干流上，距上游南平市 94km，下距福州市 84km。工程开发任务以发电为主，兼有航运、过木、防洪等综合利用效益，见图 1。电站装机容量 1400MW，多年平均年发电量 49.5 亿 kW·h，用 8 回出线 220kV 电压供电给福建省电力系统，担负系统调峰任务。库区将形成深水航道，年过坝货运量可达 400 万 t，并可提高南平市防洪标准达到 20 年一遇洪水。

水文和水库特性　坝址以上流域面积 52 438km²，为闽江总流域面积的 86%，多年平均流量 1728m³/s，多年平均年径流量 545 亿 m³。1000 年一遇设计洪水流量 43 600m³/s，设计洪水位 64.99m；10 000 年一遇校核洪水流量 51 800m³/s，校核洪水位 67.68m，总库容 26 亿 m³。水库正常蓄水位 65.00m，相应库容 23.4 亿 m³；汛期限制水位 61.00m；最低消落水位 57.00m，调节库容 7 亿 m³；死水位 55.00m，相应库容 15 亿 m³。为季调节水库。



图 1　水口水电站

枢纽布置　枢纽工程由大坝、泄水建筑物、厂房、通航建筑物等组成，见图 2。

大坝　混凝土重力坝，部分为碾压混凝土坝，部分坝体为掺加 MgO 的混凝土。坝顶高程 74.00m，最大坝高 101m，坝顶长 783m。

泄水建筑物　主要有 12 个溢流表孔，孔口尺寸 15m×22.9m（宽×高），堰顶高程 43.00m，溢流前缘总长 243m，最大泄洪流量 51 800m³/s，挑流消能；表孔两侧各设 1 孔 5m×8m（宽×高）的泄洪底孔，底坎高程 20.00m，挑流消能。

厂房　坝后式厂房，长 304.2m、宽 34.5m、高 68.2m，安装 7 台单机容量为 200MW 的轴流转桨式水轮发电机组。电站进水口底坎高程 25.00m，压力钢管直径 10.5m，采用坝内斜管布置。水轮机转轮直径 8m，额定水头 47m，最大水头 57.8m，最小水头 30.9m，额定出力 204MW，额定转速 107r/min，最大效率 95%，设计点效率 94.5%。发电机为伞式空冷型，额定电压 13.8kV，额定容量 222.2MV·A，额定功率因数 0.9。7 台 220kV 主变压器布置在厂坝间副厂房顶上。220kV 户外式开关站位于厂房下游 620m 处左侧山坡上。500kV 户外式开关站，位于左岸坝头下游 150m 处左侧的山坡上，220kV 开关站的 1 回备用线路通过 500kV 主变压器与 500kV 华东电网相联。

通航建筑物　为一线三级船闸和一线垂直升船机。船闸位于溢流坝右侧，总水头 57.36m，单级最大水头 41.74m，闸室有效尺度为 135m×12m×3.0m（长×宽×吃水深，下同），总长 560.85m，可一次通过 2 艘 500t 级驳船。2×500t 级全平衡重、垂直卷扬式升船机，总提升高度 57m。船厢有效尺度为 124m×10.5m×1.5m。船闸和升船机，可满足远景年过坝货运量 400 万 t 及木（竹）年过坝运量 200 万～250 万 m³ 的要求。

工程施工　施工采用明渠导流，分 3 期施工。二期围堰拦断主河槽。上游围堰最大堰高 44.55m，采用土石围堰，塑性混凝土防渗墙及复合土工膜防渗心墙防渗，最大防渗高度 69.60m。

工程于 1987 年 3 月主体工程开工，1989 年 9 月 25 日大江截流，1993 年 4 月初下闸蓄水，1993 年 8 月 6 日第一台机组发电，1996 年 11 月全部 7 台机组发电。

主要工程量：土方开挖 214 万 m³，土石方填筑 320 万 m³，石方开挖 667 万 m³，混凝土浇筑 360 万 m³，金属结构安装 2.1 万 t。

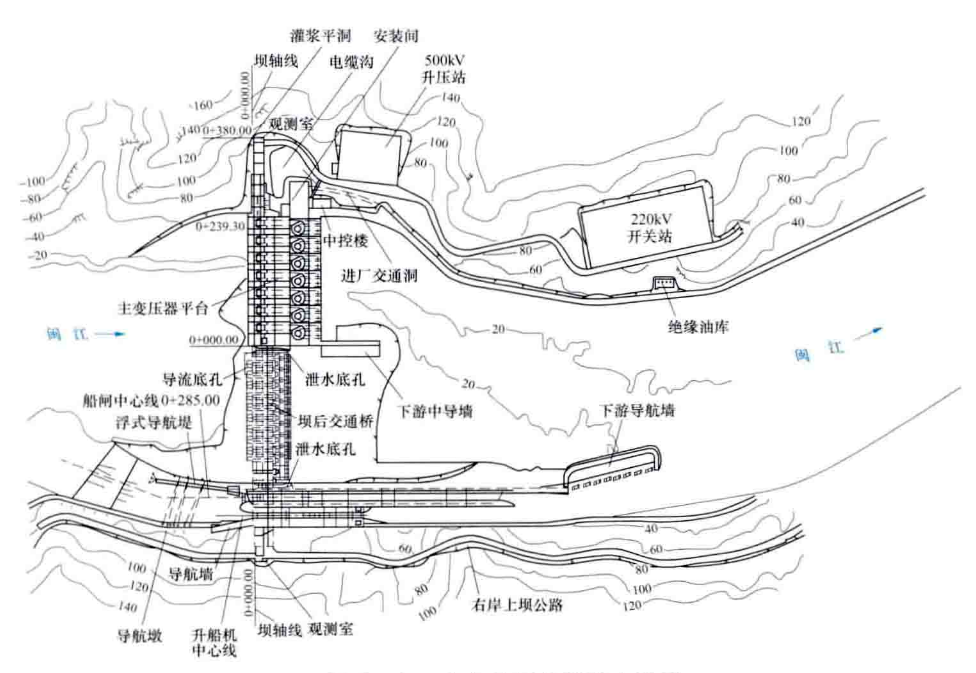


图 2　水口水电站枢纽平面布置图

设计单位　华东勘测设计研究院（现中国水电顾问集团华东勘测设计研究院）。

建设单位　福建水口水电站工程建设公司。

shuiku

水库

水库　(reservoir)　利用天然地形并修建挡水建筑物所形成的人工湖泊。

功能　水库常是水电站的重要组成部分，其作用有：①利用挡水建筑物壅高水位，集中水头用以发电、增加库内航运水深或提高取水高程以扩大供水范围。②调节径流，使天然的入库流量过程改变成能适应发电和其他用水要求的流量过程出库。常规水电站一般利用河谷、湖泊建库，可形成较大库容。乌干达欧文瀑布（Owen Falls）水电站利用维多利亚（Victoria）湖建库，库容 2048 亿 m^3，是世界上库容规模最大的水电站。中国长江三峡水利枢纽正常蓄水位相应库容 393 亿 m^3，是中国已建成的最大水库。中国的镜泊湖水电站利用天然湖泊作水库，库容 18.2 亿 m^3；六郎洞水电站利用地下天然溶洞修建成水库。抽水蓄能电站常利用湖泊或河谷修建上、下水库，有时利用洼地，或通过开挖建成水库，这种水库的库容一般较小。

特征水位和库容划分　水库蓄水的容积大小取决于坝的壅水高度（水库水位）和库区的地形条件。可利用水库地形图量度各高程的水库面积，据此计算出各库水位时的库容并绘制库水位与库容的关系曲线，简称库容曲线。

按照对水库的径流调节要求，经径流调节计算和优化后，可得出各种水库特征水位。据此，可将水库库容划分为几个区域，如图 1 所示。死水位以下的库容称为死库容，不用于调节径流。正常蓄水位与死水位之间的库容称为兴利库容，又称有效库容或调节库容，用于为兴利（如为发电、航运、供水等）目的对径流进行调节。从防洪限制水位到校核洪水位之间的库容，用于调蓄洪水，称为调洪库容。调洪库容按照调洪要求又可分为两部分：从防洪限制水位到防洪高水位之间的库容，为用以减轻或避免下游洪灾而对洪水进行调蓄所需的库容，又称防洪库容；防洪高水位以上到校核洪水位之间的库容，是在发生超过下游防洪标准的频率洪水时，由于水库下泄流量受泄水建筑物泄水能力的限制，为保证水库自身安全而用以蓄纳未能排出的这部分洪水量的库容。从防洪限制水位至正常蓄水位之间的库容，称为共用库容，在防洪期间用于调蓄洪水，其余时间用于为兴利调节径流。校核洪水位以下的全部库容称为总库容。

分类　有多种分类方法，如：①按对径流的调节能力可分为多年调节、年（季）调节、周调节和日调节水库。②按总库容规模的大小分类，各国划分的标准不同。中国划分为大、中、小型 3 种：库容在 1 亿 m^3（含 1 亿 m^3）以上为大型水库；1 亿到 1000 万 m^3（含 1000 万 m^3）为中型水库；1000 万 m^3 以下为小型水库。③按库区的地形、地貌条件可分为平原水库、丘陵水库、峡谷水库等。④按水库承担的主要任务可分为发电水库、防洪水库、灌溉水库、供水水库、航运水库和综合利用水库等。表 1 列出了世界上已建成的库容在 500 亿 m^3 以上的水库。

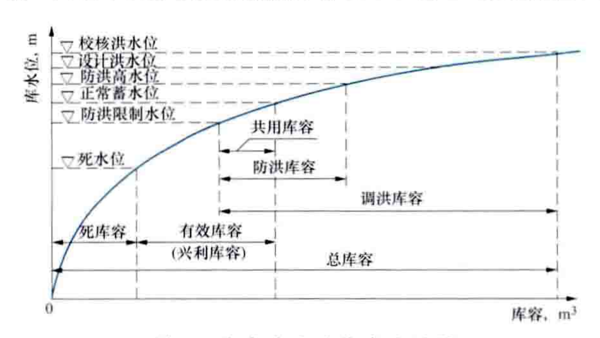


图 1　库容曲线及库容分区图

表 1　世界上已建成的库容 500 亿 m^3 以上的水库

水电站名称	所在国家	库容（亿 m^3）	坝高（m）	建成年份
欧文瀑布（Owen Falls）	乌干达	2048	30	1954
布拉茨克（Братск）	俄罗斯	1690	125	1964
阿斯旺（Aswan）	埃　及	1620	111	1970
卡里巴（Kariba）	津巴布韦 赞比亚	1604	128	1959
阿科松博（Akosombo）	加　纳	1480	134	1965
丹尼尔·约翰逊（Daniel Johnson）	加拿大	1419	214	1968
古里（Guri）	委内瑞拉	1350	162	1986

续表

水电站名称	所在国家	库容（亿 m^3）	坝高（m）	建成年份
克拉斯诺雅尔斯克（Красно-Ярск）	俄罗斯	733	124	1967
贝奈特（W. A. C. Bennett）	加拿大	703	183	1967
结雅（Зея）	俄罗斯	684	115	1978
卡博拉巴萨（Cobora Basa）	莫桑比克	630	171	1974
拉格朗德二级（La Grande Ⅱ）	加拿大	617	168	1978
拉格朗德三级（La Grande Ⅲ）	加拿大	600	93	1981
乌斯特-伊里姆（Усть Илимская）	俄罗斯	594	105	1977
鲍古昌（Богуцанская）	俄罗斯	582	87	
伏尔加列宁（Волжская Ленин）	俄罗斯	580	45	1955
塞腊达梅萨（Serra da Mesa）	巴　西	544	144	
卡涅皮斯考（Caniapiscau）	加拿大	538	56	1980

环境影响　水库对其附近地区直接和间接地产生有利和不利的影响。直接的有利影响主要有：提高下游防洪标准，减少下游洪涝灾害；改善局地小气候，有利于生活和生产；为灌溉、航运、渔业、城乡生活和生产等用水提高供水的保证程度等。间接的有利影响主要有：以清洁的水电代替火电，减少火电对空气和环境的污染，又可节约宝贵的矿物燃料；并可为旅游业的发展创造条件。直接的不利影响主要有：水库淹没农田、森林、城镇，减少垦殖资源和造成居民迁移；水库内水深增加、流速减小、水温改变，影响水生生物的栖息和繁殖环境；引起部分地区沼泽化、诱发地震和部分库岸坍滑等。间接的不利影响主要有降低移民安置区的人均资源占有量；城镇迁建占用土地等。

在水库设计中，应对水库的环境影响进行深入的调查、研究、分析，做出预测和评价，并采取适当措施以减免其不利影响。

妥善安置移民和补偿水库淹没、浸没所造成的损失，不仅是经济问题，也是社会问题和政治问题，历来受到审慎对待。在设计过程中，应认真细致地查明淹没、浸没的实物数量、需迁移的人口以及移民安置区的资源和原有居民的生活、生产条件，根据国家有关规定拟定补偿标准，编制切实可行的移民安置规划方案，使移民在迁移后能拥有必要的资源和生产生活资料，搬迁后能逐步达到或者超过原有的生产、生活水平。

水库安全　水库的运行安全至关重要，挡水建筑物一旦失事，大量水体在短时间内下泄，会造成下游两岸严重洪灾，对部分地区甚至会形成毁灭性灾害。水库调度运行不当或泄水建筑物泄水能力不足，使水库超水位蓄水，也将导致大片淹没或浸没损失。水库安全保证措施有：

（1）防止溃坝。库内水体如漫溢坝顶下泄，常是土石坝溃坝的主要原因之一。为此，世界各国大都制订有水库防洪标准，要求水库有足够的调洪库容、泄水建筑物有足够的泄水能力，以保证在发生稀遇的设计洪水和校核洪水情况下，也不致库水漫溢坝顶。中国制定的水库防洪标准（见洪水调节），按水库库容、工程重要性和水库失事将造成的灾害程度，分别采用不同的标准，大中型水库校核洪水的频率为可能最大洪水到500年一遇。造成溃坝的另一主要原因为坝体或坝基的强度不足。为此，在坝址选择和坝基处理设计中，要进行详细的勘测和认真的研究；在施工中要精心施工，确保坝体和坝基处理的施工质量达到设计要求；在运行中要建立严密的组织和制订完善的制度，严格按设计编制并经审查批准的水库调度方案进行调度，按设计要求定期检查和观测监视坝和坝基的运行情况，并检查和维护泄水设施及其启闭设备，设置备用电源，以确保在紧急时能按调度方案运行泄水。

（2）库岸和坝体坝基的防渗。库岸和坝体、坝基的渗漏，会降低水库效益；坝体或坝基的渗漏如超过设计允许数量，也会影响水库安全。为此，在勘测中要查明库址有否通向库外的漏水通道，如在喀斯特地区建库，尤需重视。一般要对库区进行详细的地质勘测和研究分析，做出正确的评价和结论，必要时应采取工程防渗措施。对坝体和坝基一般都设置有防渗设施，并在其下游设置排水设施，以减少渗漏量和降低坝体、坝基内的扬压力。上述的防渗和排水设施均需精心设计、精心施工，确保其能起设计要求的防渗减压作用。（见渗流控制）

（3）库岸和上游河道岸坡的滑坡和崩塌。库岸滑坡或崩塌会引起库内涌浪。涌浪在水库内向上下游传播，将威胁水库两岸的安全；当涌浪传播至坝址处，其浪顶高程如超过了坝顶高程，将发生浪水漫溢，危及坝后厂房，也可能导致溃坝。库岸大量滑坡崩塌物堆积在水库中将减少库容，有时还会阻碍航行。库岸或水库上游一带河道岸坡的特大型滑坡、崩塌，如在水库或河道中堆积成天然坝，拦阻上游来水，持续壅高上游水位，最终会漫溢天然坝顶而导致天然坝溃决，形成溃坝洪水，也将危及水库安全。为此，查明水库岸坡在蓄水和运行情况下，以及上游一带河道岸坡在天然情况下是否会失稳而造成滑坡崩塌的勘测研究工作，也属水库设计的必要内容。必要时应在水库工程施工的同时，对水库岸坡或上游一带河道岸坡的潜在不稳定地段，进行工程处理以消除隐患。

（4）泥沙淤积。水流进入水库后，流速逐渐减小，水流挟沙的能力逐渐降低，泥沙将沿流程淤积在库内，使库底逐渐抬高，库容逐渐缩小。库内泥沙淤积，既影响水库的调节能力，又使库区的回水位升高，在库尾这一现象更为显著（见水库变动回水区），将危及库尾的耕地、居民点、企业和交通设施。为此，在水库设计中要专门研究泥沙淤积问题，必要时应采取减少泥沙淤积的措施，如在挡水建筑物上设置排沙设施，采用利于排沙的水库调度方式等。在计算水库回水和编制移民方案时，要同时考虑库内泥沙淤积的影响。

shuiku biandong huishuiqu

水库变动回水区

（fluctuating backwater region of reservoir）　水库最高水位回水末端和最低水位回水末端之间的河段。水库变动回水区具有水库和河道的双重特性。在水库蓄水期，变动回水区受壅水影响，水流流速降低，泥沙迅速落淤。当水库水位消落时，变动回水区自上而

下逐渐脱离壅水影响，恢复天然河道状态，水流流速提高，蓄水期落淤的泥沙将被水流冲刷起动，搬运至下游深水区内。水库变动回水区内，水位变化频繁，泥沙冲淤交替，其变化幅度均远大于天然河流，但总体以淤积为主，河段内总会有一定的累计性淤积。

变动回水区的泥沙冲淤数量和冲淤过程主要取决于水库的运行方式。河流的绝大部分泥沙来自汛期，水库在汛期作蓄水运用，大量泥沙将淤积在变动回水区内。汛期水库水位越高，淤积的泥沙量就越大。枯水期水库因供水而水位下降时，变动回水区内会发生强烈的冲刷现象。对于沙质河床，在宽浅的过渡段，河道中将产生强烈的沙波运动，导致航道迁徙不定和水深变化无常。对于卵石河床的浅滩部位，枯水期的小流量可能难以冲走汛期搬运来的大量卵石，从而使水深不足和碍航。在航运发达的河流上修建水库时，为了减少水库消落期间的冲刷沙量，需要适当地降低汛期水库水位和抬高枯水期水位。

水库变动回水区大致可分为上段和下段两部分。在变动回水区上段，水库壅水影响的持续时间较短，水位壅高值也较小，建库后除泥沙淤积量将较天然情况有所增多外，河流的形式不致产生重大的变化。在变动回水区的下段，由于壅水作用增大，建库后往往会产生河型的变化。通常，河流平面形态的变化趋势是分汊河道向单一河道发展，弯曲河道向微弯河道发展。在横向的形态方面，由于水位变幅增加，河道向高滩深槽发展，断面较天然情况下窄深。这些变化都有利于改善航运条件。河型的转化会导致河流的主槽易位，当新的航槽中存在礁石等碍航因素时，需要进行一定的整治。

shuiku chuqi xushui

水库初期蓄水

(reservoir initial filling) 水库从开始蓄水至正常运行，水库的充蓄和初期运行过程。水库建成后，一般采取边蓄水边发挥效益的方式进行。水库初期蓄水时间的长短，主要取决于水库容积、来水量的大小与初期蓄水任务。初期蓄水需要时间较长时，都应进行水库初期充蓄计算。在水库初期蓄水期间，要权衡水电站供水、供电的效益，并且协调来水、供水、蓄水、生态用水以及水资源综合利用各用户之间的矛盾。水库初期蓄水计划与工程进度安排、移民搬迁工作、水电装机程序及工程效益发挥有着密切的关系。

水库初期蓄水方案的研究内容 包括制订初期蓄水期的发电计划、水资源综合利用方案、水库充蓄和充蓄期运行方式等。

（1）制订初期蓄水期的发电计划。根据近期和远景兼顾的原则制订。水库初期运行时，多蓄水少发电，可较早进入正常运行阶段，对于发挥电站的正常效益是有利的，但却相应减少了初期运行的效益；反之，虽然初期运行效益较大，却是以牺牲正常效益为代价的。故两者必须兼顾。

（2）制订水资源综合利用方案。在水库初期蓄水期间，由于水库蓄水量较小，尚不能充分满足各用户对水资源的要求，存在较突出的供需矛盾，水资源综合利用方案应协调水库充蓄期各用户对水资源要求的矛盾，按综合利用效益最大的原则制订。

（3）制订水库充蓄和充蓄期运行方式。在水库初期蓄水期水资源综合利用方案和初期发电计划的基础上制订。

水库初期蓄水的制约因素 主要有：①坝、水库及发送电工程的施工和水库清理及移民安置的进度。②根据保坝要求的水库允许最高蓄水位和充蓄的速度。③因水库蓄水可能导致的库岸坍塌等水库地质问题。

水库初期蓄水阶段划分 初期蓄水计算时一般可分为两个阶段考虑，第一阶段是由封堵导流设施，开始充蓄水库至第一台机组开始发电（发挥效益）的时期，即单纯蓄水阶段（当然还需泄放下游发电或综合用水所必需的流量）；第二阶段由水库开始发电（发挥效益）至正常运行的时期，即初期运行阶段。

制订初期蓄水方案的步骤 首先应根据施工进度计划和综合利用各用户的具体情况，拟定各种可能的综合利用方案。

单纯蓄水阶段 包括：①根据施工进度、移民情况及发电要求等设定水库开始蓄水的时间；根据水轮机的最小工作水头，或其他综合用水部门要求的最低水位，确定水电站初期运行的起始水位 Z_0。②来水过程，一般可采用中等枯水年（洪水频率 $P=75\%$）、平水年（$P=50\%$）和中等丰水年（$P=25\%$），对于蓄水保证要求特别高和防洪度汛条件较差的水电站，可采用特枯水年（$P=95\%$）、平水年（$P=50\%$）和中等丰水年（$P=25\%$）。③进行初期蓄水计算，推求水库蓄水达到初期运行水位 Z_0 的时间。计算中应注意扣除在蓄水期必须向下游泄放的水量（如发电、居民生活用水、灌溉、生态用水等）、水库蒸发及渗漏损失。

初期运行阶段 具体步骤为：

（1）假定若干个初期蓄水年数。根据电力系统的情况，对各种综合利用方案，假定若干个初期蓄水的年数，派生出组合方案。

（2）选择代表年组。对拟定的各种初期蓄水的年数，统计相应年组的水量保证率曲线，从而选出有代表性的各种保证率的水量及其流量过程。

（3）进行电力电量平衡。根据各种综合利用方案、不同年组和不同保证率的流量过程，大致估计可发的出力和电量，进行逐年电力电量平衡。求得不同保证率情况下，电力系统要求水电站各年逐时段的出力和电量，作为初期蓄水计算的依据。

（4）进行初期蓄水计算。对各种综合利用方案、不同年组和不同保证率的流量过程，以及电力系统对水电站的出力和电量的要求，进行初期蓄水计算。初期蓄水计算的边界条件是：①水库蓄水达到正常运行的年份，与原假定的蓄水年数相适应。②蓄水期电站的出力与电力电量平衡的要求相一致。③满足各综合利用方案的要求。若不能满足上述边界条件，则需根据计算结果，重新假定可发出力和电量，进行电力电量平衡和初期蓄水计算，直至满足边界条件为止。

（5）经济分析（见水电站方案经济比较）。按各组合方案不同保证率初期蓄水和电力电量平衡的结果，进行系统费用现值计算。计算期终止年份不早于最晚进入正常运行的年份。按系统费用最小的原则，结合其他因素，选定与各综合利用方案相应的、水电站最有利的初期蓄水年数。

（6）综合利用分析和方案选择。对各综合利用方案进行综合利用效益和费用计算和分析，结合技术和其他因素，选定合理的综合利用和水电站初期蓄水方案。

初期蓄水计算 可采用时历法或数理统计法。

（1）时历法。根据选定代表年组的流量过程，在满足水

库运行约束和综合利用要求的前提下，按电力电量平衡的要求进行逐时段的径流调节。（见时历法径流调节）

（2）数理统计法。先给出年水量保证率曲线，进行径流调节，计算逐年充蓄的保证率曲线。直到各年蓄水保证率完全重合或接近重合即表示水库蓄水已趋于稳定，水库已进入正常运行状态。（见数理统计法径流调节）

初期蓄水期的防洪度汛方案 根据对应时段的工程泄洪能力（包括导流设施和永久泄洪设施），以按丰水年分析的初期蓄水水位过程，对相应度汛标准进行洪水调节计算，提出大坝和围堰挡水高程要求，或调整蓄水方案，以保证初期蓄水期围堰和大坝等设施满足对应的防洪标准。

参考书目

电力工业部成都勘测设计院．水能设计．北京：电力工业出版社，1981.

shuiku diaodutu

水库调度图

（reservoir operation chart） 指导水库合理运行（即运行决策）的调度线的集合。水电站水库的运行，应合理利用流量和水头，以尽可能获得最大的发电效益。但由于水电站运行期河川的长系列径流是难以预知的，因此对水电站难以预先做出长期的运行决策，故在径流调节的基础上，统计出水库蓄放水规律，对一年中的各时段，求出水库状态（库容或水位）与出力的关系曲线，以指导水库运行。在水库运行中，可以根据面临时段初的水库状态，做出面临时段的出力决策，以期在保证水电站正常运行的前提下，尽可能增加发电效益。

水库调度图的形式和特点 水库调度图以曲线（调度线）组表示（也可用表格表示），如图1所示。

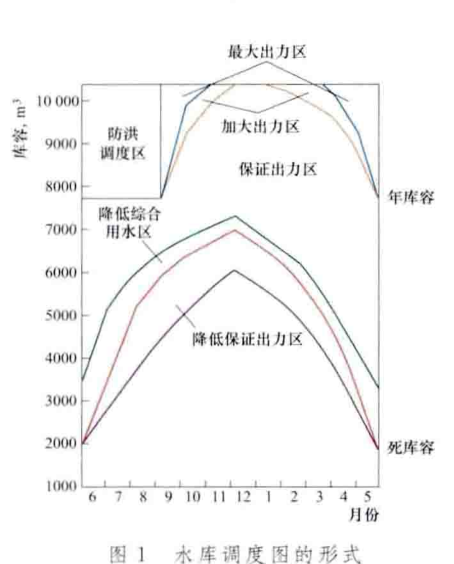


图1 水库调度图的形式

发电水库调度图 分4个运行区，从下到上分别为降低保证出力（即设计保证率以外水电站的时段最小出力）区、保证出力区、加大出力（大于保证出力）区和最大出力（电站满载运行）区，见图1。多年调节水库，保证出力区较大，其上调度线的最小库容为年库容，下调度线的最小库容为死库容。季（年）调节水库，保证出力区较小，下调度线的最小库容也为死库容。

综合利用水库调度图 除发电水库调度图的4个区外，尚有综合利用的调度区：①防洪调度区，在正常蓄水位以上，若有防洪限制水位，则放在防洪限制水位以上，该区按防洪要求进行调度，其泄流量应优先考虑由电站下泄。②城市及工业用水，其保证率高于发电，应确保，一般与发电结合。③灌溉调度区，由于灌溉保证率一般低于发电设计保证率，在发电的保证出力区内划为两个区，其上区保证灌溉用水，下区按降低灌溉要求考虑。④下游航运调度区，与灌溉相似，见图1。

单库发电调度图的常规制作方法 具体步骤包括初始计算，选水量模型，保证出力区上、下调度线制作，降低保证出力下调度线制作，加大出力区调度线制作，以及调度图的检验与修正。

初始计算 进行长系列径流调节计算，求得与设计保证率相应的保证出力与降低保证出力。

选水量模型 选择若干个年水量保证率接近设计保证率，且年内水量分配不同的水文代表年（前一年丰水期初到次年枯期末）作为计算的枯水模型。综合利用方面的水量模型，方法相似。

保证出力区上、下调度线制作 对各枯水模型，从次年枯期末死水位开始进行逐时段调节计算，逆时序倒算至汛期初，求得各年发保证出力的水库蓄水指示线，若丰水期初水库水位未回到死水位，则对全年水量按某种比例进行修正，直到满足汛期初回到死水位为止。对各枯水模型计算的库容过程，水库水位的下包线即为保证出力区的下调度线，水库水位的上包线即为保证出力区的上调度线。

降低保证出力下调度线制作 仿保证出力区下调度线的制作方法进行制作。与保证出力下调度线的不同之处为：①枯水模型应为保证率以外的特枯水年。②计算的出力应为降低出力。

加大出力区调度线制作 从保证出力到装机容量，可设定若干个加大出力值，并选与之相应的水量模型，与保证出力区下调度线的制作方法相似，按加大出力值，进行一年的径流调节计算，其边界条件为从年库容到年库容。各种加大出力线组成加大出力区。

调度图的检验与修正 调度图制成后，按调度图进行长系列的径流调节计算，并统计计算结果的保证率是否与设计保证率一致。若一致，则调度图即为所求；若保证率偏小，则应减少保证出力，重新制作新调度图；若保证率偏大，则应加大保证出力，重新制作新调度图。这是一个迭代过程，可用变步长搜索法搜索区间，并用弦截法收敛。

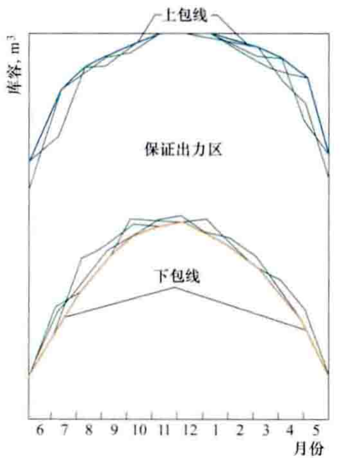


图2 水库调度图的保证出力区制作示意

水库调度图的制作示意见图2。图中的细线为按不同的水量模型进行调节计算求得的库容（或库水位）过程线，粗线为上、下包线。

其他形式的水库调度图 包括预报水库调度图、优化水库调度图、库群调度图等。

预报水库调度图 调度图的形式与无预报的调度图略有不同，出力决策的信息，除水库状态外，还应增加面临时段的水量，即其纵坐标应为面临时段

的库容加预报的水量。

优化水库调度图　多为随机型，多按随机动态规划方法制作。(见水电站水库优化调度)

库群调度图　状态变量为库群的水库蓄能，决策变量为水电站群的出力。可由水库群优化补偿调节计算结果进行统计而得。

shuiku gongcheng dizhi kancha

水库工程地质勘察　(engineering geological investigation for reservoir)　为论证水库蓄水引起的各种工程地质问题所进行的综合调查工作。水库工程地质问题主要包括水库渗漏、浸没、库岸稳定、固体径流、水库地震。勘察工作分阶段进行，不同阶段的勘察任务、内容、方法及提交成果深度都有相应的要求。

勘察任务　包括：①规划阶段。了解各规划梯级水库的基本地质条件和主要工程地质问题，分析成库条件。②预可行性研究阶段。初步查明水库区的主要工程地质条件，并对影响方案成立的主要工程地质问题作出初步评价。初步查明水库移民集中安置区和专项复建工程场地的工程地质条件，评价场地的稳定性和适宜性。③可行性研究阶段。查明水库区水文地质、工程地质条件，分析工程地质问题，预测蓄水后的变化；查明水库移民集中安置区和专项复建工程场地的地质条件，评价拟建场地建筑物地段的稳定性。④招标设计阶段。对上阶段遗留的、或新发现的、优化变更设计需进一步查明的地质问题补充勘察，复核或补充查明水库移民集中安置区和专项复建工程场地的工程地质条件，为编制招标设计文件提供地质资料。⑤施工详图阶段。对水库蓄水过程中或移民安置区（点）建设施工中出现的工程地质问题进行补充勘察与提出处理建议。

勘察内容　包括：①规划阶段。主要了解水库区地形地貌、水文地质条件；对水库有影响的滑坡、不稳定体、泥石流及塌岸、浸没等的分布与范围；岩溶发育及含水层、隔水层分布，河谷和地下水位，并对水库渗漏可能性进行分析。②预可行性研究阶段。初步查明水库区工程地质条件，对严重渗漏地段和渗漏类型、范围等作出评价；水库库岸稳定条件，初步评价对工程的影响以及对城镇、居民区的可能影响；可能浸没地段的地质和水文地质条件，并进行初判；对水库地震进行预测分析；移民集中安置区和专项复建工程场地的工程地质条件，评价其稳定性和适宜性。③可行性研究阶段。查明水库区工程地质条件，对水库渗漏问题、库岸稳定问题、浸没问题、固体径流、水库地震等进行分析评价；对库区移民安置点场地和复建工程场地进行勘察与评价。④招标设计和施工详图阶段。根据需要，对水库渗漏、库岸稳定、水库浸没、塌岸、泥石流等问题进行复核、补充勘察和作出评价，对施工期和蓄水初期新揭示的水库区地质问题进行补充勘察和评价；对库区有关渗漏、岩土体变形监测、水库地震监测与布置进行分析和提出地质建议。

勘察方法　主要有：①规划阶段。可结合区域地质调查进行，在了解一般水文地质及工程地质条件的基础上，初步分析评价水库地质问题。如存在重大工程地质问题，则需进行专门的库区工程地质测绘，有重点的布置少量勘探工作。②预可行性研究阶段。根据水库区可能存在的工程地质问题进行大范围库区地质测绘，并针对可能渗漏、浸没、不稳定岸坡、水库地震等区段布置勘探、试验和必要的监测工作，初步查明和评价水库区的工程地质条件及存在的问题。水库移民集中安置区的勘察以工程地质测绘为主，针对存在的主要地质问题布置勘探、试验工作，以评价场地的稳定性和适宜性。专项复建工程勘察工作布置应满足场址比选及方案初步地质评价的需要。③可行性研究阶段。在存在工程地质问题的区段，进行大比例尺地质测绘，综合使用勘探、试验及监测等各种方法，查明和评价存在的工程地质问题。水库移民集中安置区的勘察，在大比例尺地质测绘的基础上，针对场地周边及场内边坡、场内挡墙地基及拟建建筑物地段布置勘探及试验工作。专项复建工程勘察工作布置应满足方案比选、推荐方案地质分析评价的需要。④招标设计阶段。以工程地质复核、监测为主，对重大工程地质问题进行专题研究。水库移民集中安置区和专项复建工程勘察，以地质复核为主，根据实际需要补充勘探、试验工作。⑤施工详图阶段。以现场监测、施工地质配合为主，针对水库蓄水过程中出现的专门性工程地质问题，补充布置勘探、试验工作。水库移民集中安置区和专项复建工程勘察，以现场施工地质配合为主，必要时补充布置勘探、试验工作。

主要工程地质问题勘察　包括：①水库渗漏。指库水向低的邻谷或向坝下游漏失的现象。严重的水库渗漏直接影响发电与供水效益，还可能引起邻谷或坝下游地区的浸没和边坡塌滑等环境地质问题。勘察时主要查明邻谷、低地和溶蚀洼地是否低于库水位；水库与邻谷间单薄分水岭或坝下游河湾地段的透水性及地下分水岭位置或地下水位高程；水库周边强透水岩层、大断层破碎带和古河道分布；可溶岩区岩溶发育程度，暗河、溶蚀裂隙带及相对隔水及位置；库岸地下水的补排关系和动态。②水库浸没。是指水库蓄水使水库周边地区地下水位壅高而造成的各种灾害现象，包括土壤盐渍化和沼泽化，建筑物地基沉陷或破坏，矿井充水或涌水量增大等。勘察时主要调查可能浸没区的地貌、水文地质结构、土的分层、地下水位以及土的物理与水理性质、毛管水最大上升高度和发生浸没的地下水临界深度等。③库岸稳定。指水库蓄水改变河谷岸坡的自然平衡条件而引起库岸的破坏。其破坏形式有库岸滑坡及水库塌岸两种类型。库岸滑坡是库岸岩（土）体发生滑坡的现象，规模大的滑坡激起涌浪，直接危及大坝的安全。勘察时主要调查各类滑坡及潜在不稳定岩体的分布范围和体积；水库塌岸是岸坡土体在库水及波浪的作用下，不断发生崩塌、坍落破坏的现象。土质库岸均发生有不同程度的塌岸失稳现象。如三门峡水库在蓄水两年过程中，最大塌岸宽达280m。勘察时主要调查土的分层、级配和物理力学性质，岸坡的自然稳定坡角，浪击带稳定坡角和水下浅滩坡角等。④固体径流。指来源于库区岸坡及支沟两侧的松散堆积物、土层及强烈风化破碎岩体。调查内容为库区岩土体的分布、数量、岸边坡度及植被情况等。⑤水库地震。水库蓄水后发生的地震。调查内容为水库区的区域构造背景、活断层的分布和活动时间，地震活动性及基本烈度，库区岩层的蓄能条件；可溶岩的分布和岩溶发育情况等。分析水库地震的性质、震中位置和震级大小。

勘察成果　包括报告、有关附图及附件。应编入各阶段的工程地质勘察报告，必要时单独提出专题报告。

shuiku huishui

水库回水

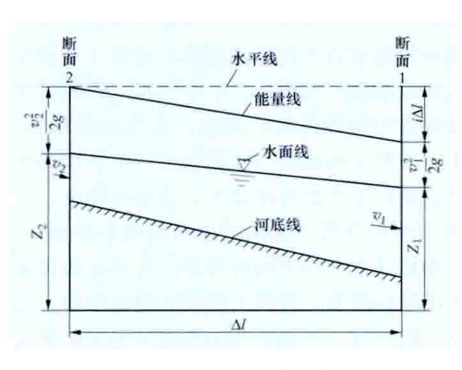
（backwater of reservoir）　河道修建闸坝形成水库后库区水位壅高的现象。其纵向水面线称水库回水线。水库回水影响范围与坝前水位高低及入库流量大小有关。当入库流量相同时，坝前水位越高，回水影响越远；当坝前水位不变时，入库流量越大，回水影响越近。

水库回水改变了库区自然环境和社会环境。局部地区气候的变化有利于库周农业和林业发展；水位抬高有利于库边灌溉及城市供水；水域扩大、流速减缓可改善航运，并为发展养鱼和旅游业创造条件。水库回水将淹没农田、森林、房屋、厂矿、道路、通信设施及文物古迹，需要迁移居民，另外造成泥沙淤积及回水末端淤积上延。水库泥沙淤积后又会进一步抬高水库回水位，增加水库淹没、浸没损失和影响。为估算水库淹没损失和影响，选定经济合理的工程规模，需要计算水库回水线。水库回水线计算一般要考虑水库泥沙淤积年限，针对不同影响对象，一般采用 10～30 年。

水库坝前水位及入库流量年内不断变化，各时期回水线也不同，水库回水线的计算属河道不恒定流问题，可用圣维南方程组计算不同时间的回水线。工程设计中需根据影响对象的防洪标准，推求其防洪标准洪水下的回水外包线。一般按恒定流能量方程（伯努利方程）分河段进行计算

$$Z_2+\frac{v_2^2}{2g}=Z_1+\frac{v_1^2}{2g}+i\Delta l$$

式中 Z_1、Z_2 及 v_1、v_2 分别为断面 1 及断面 2 的水位和流速（见图）；g 为重力加速度；i 为河段摩阻比降；Δl 为河段长度；$i\Delta l$ 表示沿程阻力的水头损失。当河段突然扩大或收缩时，式（1）中需增加局部损失项。



明渠恒定流能量平衡图

回水计算是已知河段流量 Q、下游（断面 1）的水位 Z_1 及流速 v_1，由上式逐段向上游推算。计算所需基本资料有：①库区实测纵横断面资料或水库地形图；②库区河道糙率资料；③坝址及入库设计洪水成果；④水库调洪计算成果；⑤水库泥沙淤积计算成果。

工程设计需推求某防洪标准洪水的回水最高线时，应计算许多组不同坝前水位与相应入库流量的回水线取其外包线。通常是计算某标准洪水（通过水库调节后）的最高水位与相应入库流量、入库最大流量与相应坝前水位，以及正常蓄水位与相应入库流量下的 3 条回水线，取其外包线作为确定建设征地范围的设计回水线。

河道天然水面线是水库回水线的渐近线，工程设计中通常取两者相差 0.1～0.3m 处作为回水末端。

水库回水是造成泥沙淤积的主要原因，而泥沙淤积又使回水线抬高，两者互相影响，但总的趋势是不断衰减，最终达到新的平衡。

shuikuqun buchang jingliu tiaojie

水库群补偿径流调节

（compensating runoff regulation of reservoir group）　同一电力系统中，水电站间以出力或（和）流量相互补充，从而增加水电站群发电效益的径流调节方式。在同一电力系统中，水电站群是以同一时间各水电站出力之和来满足电力系统需求的。若按各电站单独发电效益最大准则进行径流调节，水电站群的总发电效益并不是最大的，必须以水电站群的总发电效益为最大来进行水库群补偿径流调节，据此制订每个电站的运行方式。水库群补偿径流调节在径流随机过程的描述方面存在时、空多维模型的困难，故多采用时历法径流调节。

类型　按水电站间是否有水力联系，水库群补偿径流调节分为跨流域电力补偿径流调节和梯级流量补偿径流调节两类。在复杂的水电站群中，这两种补偿调节可能同时存在。

跨流域电力补偿径流调节　用于有电力联系的水电站群。在同一电力系统中不同河流的水电站，若水文特性不同（如丰、枯期出现的季节或程度不同），电站间的出力有自然补偿的作用，叫做水文补偿。跨流域电力补偿径流调节，是利用调节性能较好的水电站（补偿电站）水库对调节性能较差的水电站（被补偿电站）进行补偿调节。当被补偿电站来水多，因而多发电时，使补偿电站少发电，将水蓄起来。在被补偿电站来水不足而少发电时，用这些存水加大补偿电站的出力，从而增加水电站的总保证出力，叫做库容补偿。若有两条河流的梯级电站水库群具有不同的调节性能，则可以用调节性能好的河流梯级电站对调节性能比较差的梯级电站进行补偿调节。跨流域电力补偿调节水电站群综合保证出力的增加，常以减少补偿电站的年发电量为代价，但付出这种代价是值得的。

梯级流量补偿径流调节　用于水力上有联系的水电站群，简称梯级补偿调节。这类水电站群水文特性相似，一般不存在水文补偿效益；主要是研究梯级电站水库的蓄、放水策略，即当下游水电站区间来水流量小时，上游水电站的水库多放水，当下游水电站区间来水流量大时，上游水库少放水，从而增加梯级电站群的总保证出力或发电量。由于上游水库的放水流量经过下游各梯级发电，故其补偿效益非常显著。当上游电站的尾水位与下游电站的库水位重叠时，进行梯级补偿调节应计及因水位重叠而损失的水头。

特点　在同一电力系统中或在同一条河上有水力联系的水电站群，每一座水电站水库运行方式的改变，必然影响其他水电站水库的运行方式。水库群补偿径流调节，必须以水电站群总发电效益最大为出发点，进行运行决策，制订水电站水库群的补偿调节方式和各自的运行方式。为了取得水电站群最大的发电效益，被补偿电站和补偿电站的运行方式常有较大的差异，有时是完全相反的。以水电站群总体效益最优进行径流调节，必然偏离单库的最优，但却增加了群体的效益。按水电站群最优进行径流调节所得的各水电站的保证出力，常较各自按单库最优调节所得的保证出力为小，但水

电站群综合保证出力（按各电站同时出力相加而得的水电站群最小出力）却比按单库调节而得的结果为大。在这种情况下，单库保证出力的意义相对较小。在梯级水库群中，由于上游水库单位库容的蓄能较大（所控制的水头大），而下游水库单位水头蕴藏的能量较大（所利用的流量大），故较频繁地利用上游水库进行调节，而让下游水库较多的时间保持高水位，往往是有利的。

与单库径流调节相比，库群径流补偿调节需增加一些约束条件，如跨流域电力补偿的输电能力约束、电站最小出力约束等。

计算方法 有电当量法、逐水库补偿法、判别式法和优化法 4 种。

电当量法 一种较粗略的方法，可估计出补偿调节的周期。先按单库的情况，进行被补偿电站的径流调节，求得其出力过程和总能量，再计算补偿电站在补偿周期中的总能量。将两类电站的总能量相加，除以调节时段的长度，即得补偿调节后两类电站的均匀的总出力过程。再逐时段地将两类电站的总出力过程，减去相应被补偿电站的出力过程，即得补偿电站的出力过程。该方法较简易，可得到近似的结果。

逐水库补偿法 先对有调节能力的水库，按其调节能力由小到大进行排序。对调节能力最小的水库，进行单库调节计算求得其出力过程。然后对其他水库，按调节能力从小到大的次序，逐次加入一个电站，对已求得的电站（群）总出力进行补偿调节。其方法是在满足各种约束条件的前提下，共同最大限度地满足电力系统需求，可用迭代法求解，迭代初值可用电当量法求得。当最后一个补偿电站调节完后，即得最后结果。该法近似地模拟了逐座水电站的运行，精度高于电当量法。

判别式法 按水电站供水而引起的不蓄电能损失最小（或蓄水而引起的不蓄电能增加最大）的原则，确定水电站水库群运行的蓄放水次序的判别式，进行各电站出力的分配。在电站 1 和电站 2 共同担负系统负荷而需要供水时，下列条件成立，应由电站 1 供水；反之应由电站 2 供水，即

$$F_1H_1/F_2H_2<W_1/W_2$$

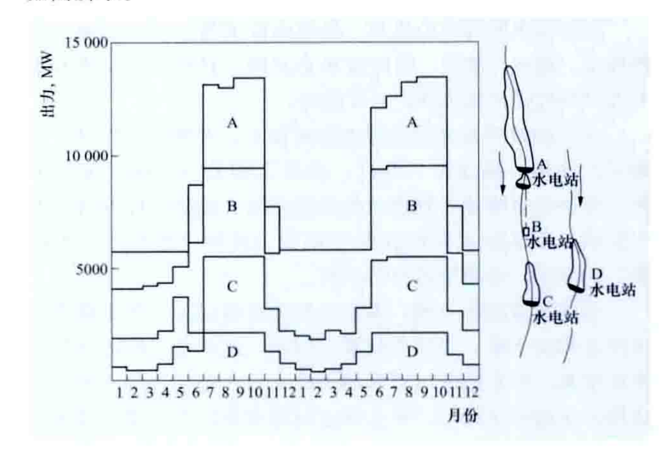
式中 F_1、F_2 为电站 1、电站 2 面临时段水库面积；H_1、H_2 为电站 1、电站 2 面临时段水头（含其下游各梯级电站的水头）；W_1、W_2 为电站 1、电站 2 面临时段水量。

若水电站多于 2 座，则应用上述原则进行供水次序排队，按次序供水。当电站需蓄水时，则把判别式反过来应用。

为获得最大的发电效益，应研究水电站的蓄放水次序，在某河流梯级水库调节能力均为年调节以下，且每年都能蓄满的情况下，蓄水次序自下而上，供水次序宜自上而下逐级操作。

判别式法从减少不蓄电能损失的角度，部分解决了水库群的优化运行问题，优于逐水库补偿法。但是，该方法尚存在一些问题：①未考虑过分地抬高库水位，可能引起后期不应发生的弃水而造成的能量损失；②上游水库常产生枯期过早放空，从而使其枯期出力过小。

优化法 用数学规划的方法，在一个模型中统一优化水库群的运行方式。常用的模型有非线性规划、线性规划和动态规划模型。（见水能利用优化）水库群补偿径流调节成果如图所示。



水库群补偿径流调节成果示意图

shuiku shuiwen nisha guance

水库水文泥沙观测

(hydrologic and sediment survey of reservoir) 系统地观测和收集水库水文、泥沙资料的工作。目的是研究水库水流泥沙运动规律，为保证工程安全、搞好运用管理、发挥工程效益、改进工程设计和科学研究提供基本资料。为适应不同的目的和任务，观测项目可概括为基本观测项目、专用观测项目、实验研究项目 3 类。①基本观测项目：为工程安全、运用管理和还原计算而需要进行长期观测的项目；②专用观测项目，根据水库情况和实际需要而观测的项目；③实验研究项目，为某项科学实验专题而开展的观测项目。有这类任务的站，一般设为水库实验站并有专门实验研究大纲。

中国 1953 年开始对官厅水库进行观测研究，其后在黄河三门峡、刘家峡、小浪底，汉江丹江口，长江葛洲坝、三峡，雅砻江二滩，大渡河龚嘴、铜街子等大型水利水电工程进行了观测研究，为中国水利水电工程泥沙设计和研究工作奠定了基础。三门峡水库的观测研究对工程改建提供了依据。全国大中型水库普遍开展了基本观测项目，有 20 座重点水库开展了实验研究工作。水库水文泥沙观测工作在国际上也普遍受到重视。美国自 20 世纪 30 年代起，每 5 年对全国所有水库淤积量进行一次测量并刊布成果。

基本观测项目 包括坝前水位、进库水沙量、出库水沙量、水库淤积量及其分布。根据库区情况和测验条件，采用断面法和地形法，对比前后两次测验结果，可求得淤积量，本次测验结果还可计算和绘制水库的水位容积曲线。

专用观测项目 包括：①水质监测，为水库的化学物质平衡和蓄水量的水质评价提供依据；②冰情观测，对有冰塞冰坝现象且影响水库或其上下游安全的水库进行观测；③水文调查，为弥补经常观测资料的不足而进行的调查。

实验研究项目 为更好地了解水库水流泥沙运动规律以便为提高经济效益、进行工程改建和改进规划设计工作提供依据。中国在下列一些项目取得一定成果：①变动回水区水沙观测；②异重流测验，包括异重流形成条件、持续运动条件、排沙效率等；③坝区水文泥沙观测；④库区淤积泥沙组成及容重测验；⑤库区洪水演进观测，在水库沿程观测流量和水位变化情况。

shuiku shuiyu kaifa liyong

水库水域开发利用 (exploitation of reservoir waters)

利用水库形成后的水域、水库水位消落区的土地发展水库养殖、航运、旅游、疗养及水上运动、种植等。水库水域开发利用应优先组织移民开发利用。

水库水域开发利用应遵循下列原则：实现统一管理，合理开发利用，服从统一调度，保证工程安全，保护水库水质，维护生态环境。利用水库发展养殖、旅游、疗养以及水上运动、库区航运等项目所需投资，按照“谁经营、谁投资”的原则，由经营者自行承担。

水库消落区的土地，是指土地征用线以下经常出露或季节性出露的土地，其所有权属于国家，由水电工程运行管理单位管理。水库消落区可资利用的土地，应结合水库运行方式提出土地利用规划，并征得运行管理单位的同意。水库消落区可资利用的土地，不计入安置移民的环境容量，只作为发展生产的潜力。

预可行性研究阶段，可不进行水库水域开发利用规划；可行性研究阶段，根据移民安置规划，结合库区环境、资源条件，提出水库水域开发利用规划；移民安置实施阶段，实施水库水域开发利用规划。

可纳入移民安置规划的水域开发利用措施主要有：①作为移民生产安置措施的水库水面网箱养殖、利用库叉等有利地形修筑鱼坝养殖等措施，所需费用可纳入移民生产安置规划费用；②兴建水库可为当地发展航运提供有利条件，要根据方便移民生产生活的原则，研究设置小型渡口、码头等水库航道专项设施，配备必要的船只，所需费用可纳入库周交通规划费用。

shuiku xiayou hedao chongshua

水库下游河道冲刷 (river degradation at downstream of reservoir)

水库下泄较高流速水流和较清水流引起下游河道冲刷的现象。由于水库壅高水位和泥沙淤积，使水库下泄水流动能增大，含沙量降低，改变了枢纽下游水流原有的水沙条件，造成枢纽下游河床的再调整，主要表现为冲刷过程。随着冲刷的不断进行，河道的比降减缓，河床粗化糙率加大，流速减小，使水流挟沙力不断减小，最终使河道逐步达到新的平衡状态。

类型　河道冲刷的类型有局部冲刷和普遍冲刷两种。局部冲刷发生在枢纽下游较短河段内，普遍冲刷则发生在下游较长河段。枢纽下游的局部冲刷，将直接危及枢纽建筑物本身的安全和下游岸坡的稳定。河床普遍冲刷范围可以向下游延伸很远的距离。例如，中国黄河三门峡水库下泄清水期间，冲刷发展到整个下游河道，全长近800km。河床的普遍冲刷使河床高程降低，因基础受到淘刷，可能危及护岸护滩、堤防和桥梁等工程的安全，对防汛不利；河道普遍冲刷会使河道展宽，滩地冲蚀，造成耕地的损失；对于通航河道，可能使航道改变，给航运带来影响。

河道冲刷过程　床沙组成通常是不均匀的，河道冲刷的结果一般会引起床沙的粗化。对于卵石组成的山区河流，河道冲刷下切一般不明显。对于卵石夹沙河段，水流冲刷使细颗粒被带走，留下的粗颗粒就会形成抗冲刷铺盖层，阻止河床下切，河道冲刷造成的比降变缓一般并不明显。对于细沙组成的河段，各级沙粒都易被水流起动，不易形成抗冲铺盖层，但同样存在着粗化现象，使河床糙率有较大幅度的增加。床沙组成变粗、糙率增大和比降调平都使水流挟沙力降低，因此也能遏制河床冲刷。

研究方法　水库下游河道冲刷的分析和研究方法通常有：①用原型河道观测分析；②泥沙数学模型计算；③实体模型试验。水库对下游河道的影响过程十分复杂，影响因素多，对于重要河段，一般采用多种方法进行，以互相补充、互相印证。

shuiku youfa dizhen

水库诱发地震 (reservoir induced earthquake)

发生在坝区、水库工程区或近岸范围内的地震活动的现象。水库诱发地震震中位置多分布在坝区、水库库盆及近岸地段范围内，距库边线一般不超过5km，最远10km。震源浅，大部分震级不大，但烈度偏高。地震活动与蓄水关系复杂。个别水库的地震活动与水位升降呈负相关。地震序列中前震丰富，最大余震和主震比较接近，余震较慢。大多数水库诱发地震与新的构造活动并无明显的相关性。碳酸盐岩地区水库诱发地震发震概率高，但一般震级不高，而火成岩区水库地震震级较高。

水库诱发地震的成因尚处在探索阶段，包括：①发震地质背景（如岩性、构造类型和规模、新的构造活动、岩溶、水文地质条件、大型不良地质体的稳定性、卸荷风化深度、矿井等）。②蓄水情况（如水深、库容、蓄水速度、高水位持续时间及蓄水环境等）。③库水的各种作用（如孔隙压力及其扩渗，水重及其引起的库底沉陷和挠曲，岩体软化、楔裂和应力腐蚀，软弱结构面的泥化和断裂面的润滑，由水体加热、汽化、冰冻和岩体浸润产生的膨胀等）。④小震串裂等作用。

全世界有30多个国家110座水库发生过地震活动，其中震级 $M_s > 6.0$ 的有4例。1967年发生在印度柯依那(Koyna)水库的6.5级地震，造成坝顶裂缝等震害。1961年中国广东省新丰江水库发生主震为6.1级的水库诱发地震，导致坝体顶部裂缝。截至2009年，中国已建的库容大于1亿 m^3 的360多座大型水库中，发生水库诱发地震的有21例，最大震级是新丰江的6.1级，参窝、丹江口、大化水库、光照水库和三峡水库分别为4.8、4.7、4.5、4.3和4.1级，其他水库发生地震震级均小于4.0级。

在水电工程设计中，按照有关规定需要在库坝工程区设置地震台网监测蓄水前后的地震活动变化。

shuiku yuji

水库淤积 (reservoir sedimentation)

因流速减缓，水流挟带的泥沙在水库内发生沉积的现象。水库淤积是世界性的问题，美国水库淤积量每年达到 1200×10^6 t，年平均库容损失率达0.71%；日本库容大于 1×10^6 m^3 的水库至1979年已淤去6.3%。中国有很多河流的含沙量高、输沙量大，水库淤积问题十分严重。据20世纪80年代初对231座大中型水库的调查，泥沙淤积量达115亿 m^3，占这些水库总库容804亿 m^3 的14.3%。

水库淤积的危害　包括：①水库有效库容减少，使水库

防洪标准和兴利效益降低；②库区河床抬高，淤积末端向上游延伸，从而抬高库区洪水位，增加淹没损失和浸没损失；③变动回水区泥沙淤积，影响航运；④坝前淤积可能影响枢纽建筑物的正常运用；⑤库尾回水位抬高，减少上游衔接水电站的发电量；⑥水库泥沙淤积导致清水下泄，可能引起下游河槽的冲刷。

水库淤积形态　按纵剖面形态可分为三角洲淤积、带状淤积和锥体淤积 3 类。

（1）三角洲淤积。当水库库容较大，来沙较粗且经常处于高水位运用时，淤积体常形成三角洲形态。三角洲淤积体的上游部分称为尾部段，进库泥沙在该河段开始落淤。三角洲的主体称为顶坡段，这里水流挟沙情况接近平衡状态，淤积河床纵坡与水面线近似平行。三角洲顶点的下游为前坡段，此段水深坡陡，流速锐减，泥沙大量淤积。三角洲前坡脚至坝前段以细沙淤积为主，见图 1。

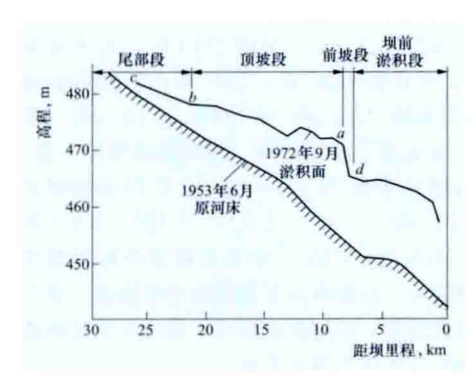


图 1　官厅水库 1972 年汛后三角洲淤积形态

（2）带状淤积。当来沙量少、泥沙颗粒细且库水位变幅很大时，常形成沿程淤积厚度比较均匀的淤积形态，见图 2。

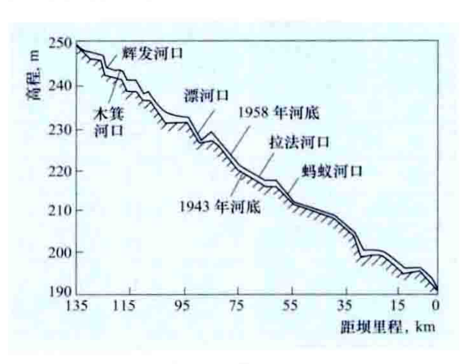


图 2　丰满水库带状淤积形态

（3）锥体淤积。当水库库容不大，河流含沙量高，泥沙颗粒细，库水位较低，库区地形狭窄时，泥沙淤积很快发展到坝前，就容易淤积成厚度上小下大的锥形体，见图 3。

水库淤积计算　水库淤积计算是预测水库形成后泥沙淤积演进的重要手段。水库淤积计算一般需要收集的基本资料包括：①入库流量；②入库输沙量、含沙量及级配；③水库地形（或纵横断面）；④库区的天然河道水位。水库淤积计算方法主要有泥沙数学模型模拟、经验法和类比法。泥沙数学模型模拟是根据水流运动方程、水流连续方程、泥沙运动方程、泥沙连续方程、河床变形方程等进行求解，能得出水库淤积过程、淤积部位（包括淤积形态）、淤积物级配及淤积引起的水位抬高等要素，是运用最普遍的水库淤积计算方法。经验法和类比法一般只能得出水库淤积形态，通常仅用于泥沙问题不严重或泥沙资料缺乏的水库。

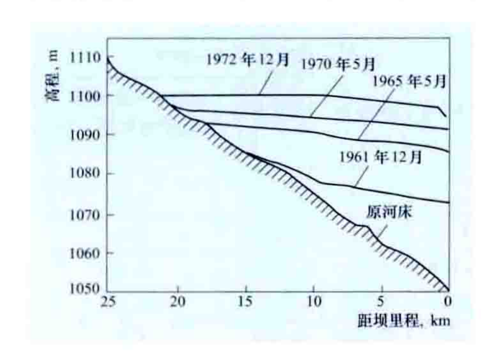


图 3　巴家嘴水库锥体淤积形态

水库淤积防治　防治方法有在水库上游开展水土保持，减少入库沙量，以及通过水库调度或工程措施尽量把进入和淤积在水库中的泥沙排出库外两种。其中，排沙方法主要有：①水力冲沙。在洪水期间降低库水位或泄空水库冲沙。此法需弃水，会使水库综合利用效益受到一定影响。②异重流排沙。常应用于干旱地区的水库排沙，可节省排沙所耗水量。③浑水排沙。排沙耗水率很小，适合干旱地区的中小型水库。④机械清淤。主要用于中小型水库。清淤机械主要有挖泥船、气力泵及水力吸泥装置等。⑤工程措施。如在壅水区上游修建旁侧排沙渠（或排沙洞），当汛期洪水入库时，可将浑水通过排沙渠（洞）直接排往坝下游。

参考书目

韩其为．水库淤积．北京：科学出版社，2003.

shuili fadian

水力发电

（hydropower）　开发河川或海洋的水能资源，将水能转换为电能的工程技术。采取集中水头和调节径流等措施，把天然水流中蕴藏的势能和动能转换为水轮机的动能，再以水轮机为原动机，推动发电机产生电能，最后经输变电设施将电能送入电力系统或直接供电给用户。水力发电有多种形式，利用河川径流水能发电的为常规水电；利用海洋潮汐能发电的为潮汐发电；利用波浪能发电的为波浪发电；利用电力系统低谷负荷时的剩余电力抽水蓄能，高峰负荷时放水发电的为抽水蓄能发电。

基本原理　水体由上游高水位，经过水轮机流向下游低水位，以其重力做功，推动水轮发电机组发出电力。机组单位时间内输出的电能称为功率，它与上下游水位差（称为水头）和单位时间流过水轮机的水体体积（称为流量）成正比，可以下式表示

$$P=\eta\rho gQH$$

式中 P 为水力发电的功率，W；η 为引水系统、水轮机和发电机的总效率（$\eta<1.0$，对大中型水电站，一般取 0.87 左右）；ρ 为水的密度，kg/m^3，淡水密度取 $1000kg/m^3$；g 为重力加速度，取 $9.81m/s^2$；Q 为通过水轮机的流量，m^3/s；H 为水头，m。

特点　水力发电具有下列特点：

（1）水能是可再生能源。地球表面的水体（以海洋为主），在太阳能的作用下，蒸发成水汽升到高空，在风力推动下，部分水汽被吹向大陆，在适当条件下凝结成水滴下降，经地面汇集补给河川径流，再汇入海洋或内陆湖泊。这是一个以太阳能为动力的水文循环，周而复始，永不停息。河川径流是这一循环中的一个环节，因而水能资源不断再生。潮汐能是由月球和太阳的引力作用产生的，波浪能是由风力作用产生的，也都不断再生。利用这些可再生的水能发电，可节省火电和核电消耗的煤、油、天然气和铀等不可再生的宝贵矿产资源。

（2）水力发电是清洁的电力生产，不排放有害气体、烟尘和废渣等污染物。

（3）水力发电的效率高。常规水电站水能的利用效率在85%左右。

（4）水力发电与火力发电等不同，可同时完成一次能源开发和二次能源转换。

（5）水力发电的生产成本低廉。无须购买、运输和储存燃料；所需运行人员较少、劳动生产率较高；管理和运行简便，运行可靠性较高。

（6）水轮发电机组起停灵活，输出功率增减快、可变幅度大，是电力系统理想的调峰、调频和事故备用电源。

（7）受河川天然径流丰枯变化的影响，水电站可发电力在年内和年际间变化较大，与用户用电需要不完全适应。因此，一般水电站需建设水库调节径流，以适应电力系统负荷的需要。现代电力系统一般采用水电站、火电厂、核电厂联合供电的方式，既可弥补水力发电天然径流丰枯不均的缺点，又能合理利用丰水期水电电量，节省火电厂消耗的燃料。潮汐能和波浪能也随时间变化，宜与其他类型电站配合供电。

（8）水电站的水库可以综合利用，发挥防洪、灌溉、航运、城乡生活和工矿生产供水、养殖、旅游等效益。如安排得当，可以做到一库多用、一水多用，获得最优的综合经济效益和社会效益。

（9）部分建有较大水库的水电站，水库淹没损失较大、移民较多。大坝阻隔、水库淹没及调节径流改变了原有水文情势，对生态环境有一定影响。这些问题需妥善处理。

（10）水能资源在地域上分布不均，建坝条件较好和水库淹没损失较小的大型水电站站址往往位于远离用电中心的偏僻地区，施工条件较困难，需要建设较长的输电线路，增加了造价和输电损失。

开发原则　水力发电涉及一次能源开发、电力系统规划和运行、水资源综合利用、社会经济发展和生态环境等诸多方面，开发水电要重视以下几点：

（1）做好地区电源及水电发展规划。根据地区用电负荷发展预测、地区一次能源规划、河流规划等工作成果，考虑与其他地区可能的能源与电力交换、水力发电与其他能源发电的最佳配合、水资源综合利用以及对生态环境影响等因素，按照全系统整体效益最优原则，统筹安排地区电力系统的电源构成、联合运行方式和水电站、火电厂的建设时序。

（2）连续开发河流梯级水电站和分片集中建设水电站群，是节约投资、加快水电建设进度的有效途径。

（3）在土地淹没和移民安置允许的条件下，在河流上游修建大型水库可提高全河径流的经济利用。在地形条件许可并对水资源利用有利时，可考虑跨流域引水（见跨流域引水发电）开发方式。

（4）水电站建设要根据具体条件因地制宜，大、中、小型并举，高、中、低水头并举，选择合理的水电站类型。在河川水能资源较缺乏地区，靠近用电中心可选择有利地点建设抽水蓄能电站，以满足电力系统调峰要求。在潮汐资源有利地区，可研究开发潮汐电站。

（5）重视水电站的环境影响，切实做好环境保护设计和实施。

（6）重视水库淹没损失，做好水库移民安置规划并切实实施，使居民迁移后能在新的环境中发展生产、安居乐业。

（7）严格执行基建程序，遵循规程规范要求。加强水电工程前期设计工作，科学制定工程建设方案；加强工程建设管理，严格施工质量检查与控制，保证工程质量安全。

建设规模　自1950年起，联合国对世界各国的电力发展进行统计。1950年全世界水电装机容量共计72 000MW，其中欧洲、北美洲和大洋洲占83.1%，亚洲、非洲和南美洲仅占16.9%。根据英国《国际水电与大坝》统计，2010年全世界水电装机容量超过937 324MW，其中欧洲、北美洲和大洋洲占38%，亚洲、非洲和南美洲增至62%。61年内，水电装机容量的平均年增长率为4.4%，见表1。表2列出了1950～2010年水电开发较多的国家水电装机发展情况。其中，中国、委内瑞拉、印度、巴西等国发展较快，平均年增长率达到6.9%～11.2%。中国1949年全国水电装机容量为362MW，居世界第20位；1990年水电装机容量为36 050MW，居世界第6位；到1995年为52 184MW，居世界第3位；2010年达到216 060MW，上升至世界第1位。61年内中国平均年增长率为11.1%，其中6个10年的年平均增长率顺序为18.9%、11%、12.7%、6.1%、7.8%和10.4%，2009～2010年为10.1%。中国水能资源居世界首位，仍有很大发展潜力。根据中国水能资源分布情况、开发条件和国民经济发展需要，中国政府提出了建设大型水电基地的构想，已规划形成十四大水电基地。

表1　世界各大洲水电装机容量发展情况

洲别	1950年		2010年		1950～2010年平均年增长率（%）
	装机容量（MW）	占世界总量的比例（%）	装机容量（MW）	占世界总量的比例（%）	
亚洲	8139	11.3	411 104	44	6.8
非洲	546	0.8	24 646	3	6.6
欧洲	32 499	45.1	177 702	19	2.9
南美洲	3422	4.8	140 926	15	6.4
北美洲	26 456	36.7	169 585	18	3.1
大洋洲	938	1.3	13 371	1	4.5
全世界总计	72 000	100	>937 324	100	4.4

资料来源：联合国《世界能源供给（1950～1974）》、联合国《世界能源统计年鉴（1995）》、英国2011年《国际水电与大坝》杂志发布的《World Atlas》。

表2　水电开发较多的国家水电装机容量发展情况（按2010年水电装机容量大小排序）

序号	国家	各年水电装机容量（MW）			
		1950年	1980年	2010年	1950～2010年平均年增长率（%）
1	中国	583	20 320	216 060	10.4
2	巴西	1536	27 522	85 000	6.9
3	美国	18 675	76 651	78 200	2.4
4	加拿大	7782	47 770	>75 000	3.8
5	俄罗斯	3218	52 511	46 873	4.6
6	印度	562	11 794	35 824	7.2
7	挪威	2902	20 012	29 973	4.0

续表

<table>
<tr><th rowspan="2">序号</th><th rowspan="2">国　家</th><th colspan="4">装机容量（MW）</th></tr>
<tr><th>1950 年</th><th>1980 年</th><th>2010 年</th><th>1950～2010 年平均年增长率（%）</th></tr>
<tr><td>8</td><td>日　本</td><td>6559</td><td>29 776</td><td>27 571</td><td>2.4</td></tr>
<tr><td>9</td><td>法　国</td><td>5272</td><td>19 285</td><td>21 300</td><td>2.4</td></tr>
<tr><td>10</td><td>西班牙</td><td>1711</td><td>12 828</td><td>18 559</td><td>4.1</td></tr>
<tr><td>11</td><td>意大利</td><td>7407</td><td>15 826</td><td>17 800</td><td>1.5</td></tr>
<tr><td>12</td><td>瑞　典</td><td>3230</td><td>14 859</td><td>16 200</td><td>2.7</td></tr>
<tr><td>13</td><td>委内瑞拉</td><td>70</td><td>2920</td><td>14 627</td><td>9.3</td></tr>
<tr><td>14</td><td>瑞　士</td><td>2860</td><td>11 450</td><td>12 297</td><td>2.5</td></tr>
</table>

注：水电装机容量中，包括常规水电站和抽水蓄能电站。

资料来源：1990 年以前的数据来源于联合国《世界能源供给（1950～1974）》、联合国《世界能源统计年鉴（1980、1990、1995）》，1999 年与 2010 年的数据来自英国《国际水电与大坝》杂志 2000 年与 2011 年发布的《World Atlas》。

沿革　人类很早就利用水力机械进行提水灌溉和农产品加工等生产活动。水力发电是在发电机和输电技术发明并得到实用之后才发展起来的。19 世纪 70 年代末，法国、德国、英国、美国等开始建设小型水电站。随着电力系统的不断扩大，水工建设、机电设备制造和输电技术不断进步，大坝越建越高，水轮发电机组越造越大，水电站单站装机容量也迅速增大。1882 年美国建造第一座商用水电站时，其装机容量仅为 10.5kW。1941 年，美国大古力水电站一期工程装机容量就达到了 1974MW。1984 年 11 月发电的巴西和巴拉圭两国合建的伊泰普水电站装机容量为 12 600MW，是 20 世纪世界上已建的最大水电站。20 世纪世界上最高的坝为塔吉克斯坦努列克水电站大坝（见图 1），最大坝高 300m，于 1980 年建成。美国大古力水电站建成时，其混流式机组是当时单机容量最大的机组，容量达 700MW。中国正在建设的雅砻江锦屏一级水电站（2013 年 9 月第一台机组投产发电），最大坝高 305m，是世界上已建、在建的最高的混凝土双曲拱坝。

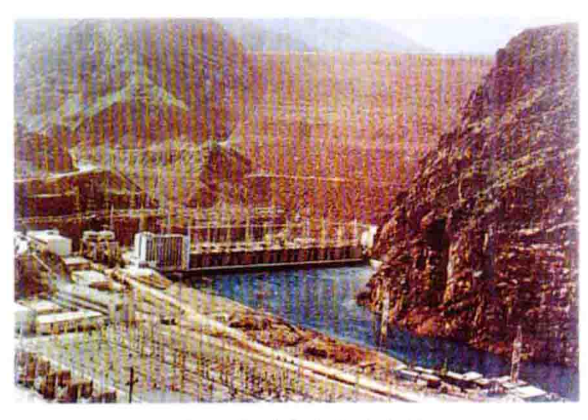


图 1　努列克水电站大坝

中国建设水电站起步较晚。1905 年台湾省建龟山水电站，装机容量 600kW。1912 年云南省建石龙坝水电站，仅装有 2 台容量为 240kW 的混流式水轮发电机组，见图 2。1949 年以前，除丰满水电站（设计规模 563MW）和水丰水电站（设计规模 630MW）装机容量较大外，其他水电站规模均甚小。1949 年以后，中国进行大规模经济建设，水力发电事业有了长足发展，筑坝技术和机电设备制造技术有了很大提高。1981 年 7 月发电的葛洲坝水电站（见葛洲坝水利枢纽），装机容量 2715MW，装有转轮直径为 11.3m 的轴流转桨式水轮机，是世界上直径最大的水轮机。1998 年 8 月发电的二滩水电站，装机容量 3300MW，混流式水轮发电机组单机容量 550MW，混凝土双曲拱坝最大坝高 240m。长江三峡水利枢纽主体工程于 1994 年 12 月正式开工，2003 年第一批机组发电，2009 年全部建成发电，电站装机容量 22 500MW，是世界上装机规模最大的水电站。



图 2　石龙坝水电站发电机组

shuili jixie

水力机械　（hydraulic machinery）　实现水流机械能与固体机械能之间互相转换的机械。水力机械可分为水力原动机、水力工作机、可逆式水力机械、液力传动装置和水力推进器 5 类。水力机械的雏形是水车，也称水轮，主要用来为提水灌溉或水轮磨坊提供动力，已有几千年历史。现代水力机械源于 18 世纪，经过几百年的不断发展和完善，在人们的生产和生活中发挥着不可替代的作用，如安装在水电站中的水轮机、安装在自来水厂中的加压水泵等。在水电工程中，水力机械指水轮机、水泵水轮机和蓄能泵等，也包括水电站辅助系统的水泵等设备。

shuili jixie danwei canshu

水力机械单位参数　（unit parameters of hydraulic machinery）　根据水力机械相似理论，取水头（或扬程）为 1m、转轮（叶轮）公称直径为 1m 换算得出的水力机械参数，包括单位转速、单位流量和单位功率。单位参数是几何相似的水力机械在运动相似和动力相似条件下共同具有的特性值，可用于相似的不同尺寸水力机械间的参数换算。实际应用时，一般假定相似水力机械间的容积效率、水力效率、机械效率、流速系数等相等，据以导出近似公式，再根据经验对计算结果加以修正。工程中，单位参数多用于模型与原型间的参数换算。

单位转速　转轮（叶轮）公称直径为 1m，在 1m 水头（扬程）下水力机械具有的转速，由圆周速度相似关系导出，用 n_{11} 表示，单位为 r/min。

单位转速近似计算公式为

$$n_{11} = \frac{nD}{\sqrt{H}} \quad (1)$$

式中 n 为转速，r/min；D 转轮或叶轮的公称直径，m；H 为工作水头或扬程，m。

单位转速反映不同型号水轮机的转速特性，不同型式水轮机、水泵水轮机或蓄能泵在不同水头（扬程）条件下具有其自身的最优单位转速 n_{110}，它随使用水头增高而降低。

以水轮机为例，表1是常用水头段的水轮机最优单位转速。随着水轮机设计水平的提高，最优单位转速有提高的趋势，这对提高机组转速，降低设备造价有利。轴流式水轮机可通过减小叶栅稠密度、减小翼形挠度和扭角，混流式水轮机可通过减小进口边的平均直径或减小叶片的进口角等来提高转速。但单位转速提高反映圆周速度增大，在水流速度三角形中表现为水流入口角减小，相对速度增大，可能导致空化性能恶化、能量指标下降，因而单位转速提高的幅度是有限的。

表1 水轮机常用水头段最优单位转速

水轮机型式	轴流式	混流式	冲击式
工作水头 H (m)	3～55	30～500	300～700
最优单位转速 n_{110} (r/min)	142～107	88.3～35*	40～39

* 采用转轮进口喉径 D_1 计算。

单位流量　转轮（叶轮）公称直径为1m，在1m水头（扬程）下的水力机械过流量，由流量相似关系导出，用 Q_{11} 表示，单位为 m^3/s。

单位流量近似计算公式为

$$Q_{11} = \frac{Q}{D^2\sqrt{H}} \quad (2)$$

式中 Q 为流量，m^3/s；D 转轮或叶轮的公称直径，m；H 为工作水头或扬程，m。

单位流量反映不同系列水轮机的过流能力，不同型式的水轮机、水泵水轮机或蓄能泵在不同水头（扬程）下的单位流量有一定限度，它随工作水头（扬程）增高而降低。以水轮机为例，常用水头段下推荐使用的最大设计单位流量 $Q_{11,max}$ 见表2。随着水轮机设计水平的提高，单位流量数值有提高的趋势，反映水轮机功率增大或直径减小。轴流式水轮机可通过减小轮毂比、缩小叶栅稠密度、增大叶片扭角和出口扭角，混流式水轮机可通过加大导叶高度、减少转轮叶片数、扩大下环扩散角、减小叶片包角和切割出水边等来提高单位流量。任何一项提高单位流量的措施都会不同程度地影响水轮机的性能，一般都是结合电站实际，在保证具有较高效率和良好空化性能的前提下，优化提高单位流量。

表2 水轮机常用水头段下推荐使用的最大设计单位流量

水轮机型式	轴流式	混流式	冲击式
工作水头 H (m)	3～55	30～500	300～700
推荐使用的最大设计单位流量 $Q_{11,max}$ (L/s)	2000～1300	1400～260*	45～30

* 采用转轮进口喉径 D_1 计算。

单位功率　转轮（叶轮）公称直径为1m，在1m水头（扬程）下的水力机械功率，由功率相似关系导出，用 P_{11} 表示，单位为kW。

单位功率近似公式为

$$P_{11} = \frac{P}{D^2 H^{3/2}} \quad (3)$$

式中 P 为水力机械功率，kW；D 为转轮或叶轮的公称直径，m；H 为工作水头或扬程，m。

shuili jixie gonglü

水力机械功率　(hydraulic machinery power)　水轮机、水泵水轮机和蓄能泵轴端输出或输入的机械功率。

对水轮机（水泵水轮机的水轮机工况），输出功率以 P_{out} 表示，单位为kW或MW，可由下式计算

$$P_{out} = \gamma Q H \eta \quad (1)$$

式中 P_{out} 为水轮机输出功率，kW；γ 为水的重度，一般取 $9.81kN/m^3$；Q 为水轮机流量，m^3/s；H 为水轮机工作水头，m；η 为水轮机效率，%。

在水轮机设计和运行中，常采用额定功率、最优效率输出功率和最大输出功率、最小输出功率等输出功率值。

(1) 水轮机额定功率 P_r，在额定水头、额定流量、额定转速下发电机发出额定功率时水轮机的输出功率。通常作为水轮机铭牌输出功率。

(2) 水轮机最优效率输出功率 $P_{\eta,max}$，水轮机在最优效率点运行时的输出功率。

(3) 水轮机最大输出功率 P_{max}，水轮机带动发电机发出其最大输出功率时的水轮机输出功率。

(4) 水轮机最小输出功率 P_{min}，水轮机在最小水头下所能发出的最大轴输出功率。

对蓄能泵（水泵水轮机的泵工况），输入功率以 $P_{p,in}$ 表示，单位为kW或MW，可由下式计算

$$P_{p,in} = \gamma Q_p H_p / \eta_p \quad (2)$$

式中 $P_{p,in}$ 为蓄能泵输入功率，kW；γ 为水的重度，一般取 $9.81kN/m^3$；Q_p 为蓄能泵流量，m^3/s；H_p 为蓄能泵工作扬程，m；η_p 为蓄能泵效率，%。

在蓄能泵设计和运行中，常采用最大输入功率、零流量功率和最小输入功率等输入功率值。

(1) 蓄能泵最大输入功率 $P_{p,r}$，额定转速和最大流量时蓄能泵所需的功率。

(2) 蓄能泵零流量功率 $P_{p,0,in}$，额定转速和流量为零时蓄能泵的输入功率。

(3) 蓄能泵最小输入功率 $P_{p,min,in}$，在规定的流量、扬程范围内，蓄能泵按额定转速保持稳定运行的最小输入功率。

shuili jixie konghua he kongshi

水力机械空化和空蚀　(cavitation and cavitation erosion of hydraulic machinery)　水力机械空化是水流通过水力机械时，其流向、流速随流道改变，在流速增高或脱流部位压力降至临界压力（一般接近汽化压力）时，水中气核成长为气泡，气泡的聚积、流动、分裂、溃灭过程的总称。空化发生时，在空化部位会发出特殊的噪声和撞击声；严重时，水力机械会出现周期性的振动以及输出功率、效率下降；有时会见到由气泡圈引起的形似闪光的现象。

由于空化造成的水轮机、水泵水轮机或蓄能泵等水力机械过流表面的材料损坏称为空蚀，过去称作“气蚀”或“气蚀破坏”。对过流表面材料，空化主要具有机械、化学和电化学等破坏作用。空蚀初期材料表面失去光泽，颜色变暗，进而材料表面变得粗糙，发展成为麻点、针孔、海绵状或蜂窝状（见图），严重时会使叶片穿孔甚至整块脱落。




定桨式水轮机转轮空蚀

按水轮机、水泵水轮机和蓄能泵产生空化的原因，空蚀大致可分为线形空蚀、间隙空蚀和空腔空蚀3类：

（1）线形空蚀。因转轮（叶轮）叶片、导叶、流道等的线形不良或偏离最优工况运行引起空化，进而造成的空蚀。

（2）间隙空蚀。流道中转动部件间或转动部件与固定部件间构成的间隙流道，水流局部流速大幅升高造成压力下降而引起空化，进而造成的空蚀。

（3）空腔空蚀。流道中因漩流、涡带引起空化，进而造成的空蚀。

导致空蚀的因素主要有：①转轮叶片或导叶线形不良；②流速场变换过大；③流速过高；④流道表面不光滑；⑤部件材料抗空蚀性能差；⑥水轮机运行工况不佳；⑦维修不及时等。

减轻空蚀需通过提高水轮机设计、制造工艺水平、材质材料，并从运行、维护、管理各方面采取措施，主要途径有：①提高水力设计水平，降低水轮机的空化系数，改善转轮或导叶线形和提高表面光洁度；②采用抗空蚀的材料；③合理选择水轮机参数，尽量避免偏离设计工况运行；④定期检查，及时维修；⑤改善过机水质等。

空蚀和泥沙磨损的联合作用　在易空化部位，由于泥沙颗粒的空化核子作用促使空化提前或加剧发生，空蚀使流道表面材料变得疏松，易于被泥沙磨损，形成不规则表面，使脱流加剧，进而加重空化。鉴于空蚀和泥沙磨损的相互促进作用造成了远比单纯空蚀或单纯泥沙磨损严重的快速破坏，实践中应尽可能避免空蚀和泥沙磨损同时出现。

空蚀程度的评定　空蚀对水轮机、水泵水轮机和蓄能泵的危害主要表现为检修周期的缩短和效率的下降。因此，宏观描述空蚀的危害程度通常是给出在一定运行条件下的机组检修周期或效率下降值。定量评定空蚀对水力机械的损坏程度的方法：在限定的运行工况、运行条件和运行小时数下，给出因空蚀造成的水力机械过流表面金属失重量、损坏表面面积或损坏表面的最大侵蚀深度。这三个数字越大，说明空蚀对水力机械的损坏程度越严重。

在实际工程中，当空蚀强度大于泥沙磨损强度时，材料表面的损坏主要表现为空蚀的特征，而当泥沙磨损强度较大时，则主要表现为泥沙磨损的特征，往往不能将空蚀量和泥沙磨损量严格地区分开来，故一般将它们合并考虑，努力将空蚀和泥沙磨损总量控制在某个范围之内。空蚀与泥沙磨损总量的评定方法与上述空蚀程度评定方法总体相同。

shuili jixie liuliang

水力机械流量　(discharge of hydraulic machinery)

单位时间内通过水力机械的水体体积，单位为m^3/s。

水轮机（水泵水轮机的水轮机工况）流量以Q表示，用下式计算

$$Q=\frac{P_{out}}{9.81H\eta} \tag{1}$$

式中P_{out}为水轮机输出功率，kW；H为工作水头，m；η为水轮机效率，%。

水轮机特征流量主要有3种：①水轮机空载流量Q_0，即水轮机在额定水头下不带负荷而为维持额定转速运行所需的流量；②水轮机额定流量Q_N，即在额定水头、额定转速下，机组发出额定功率时水轮机的流量；③水轮机最大流量Q_{max}，即在发电机发出其最大功率的最低水头$H_{g,min}$（见特征水头和扬程）下发电机发出最大功率时水轮机的流量。

蓄能泵（水泵水轮机的泵工况）流量以Q_p表示，用下式计算

$$Q_p=\frac{P_{p,in}\eta_p}{9.81H_p} \tag{2}$$

式中$P_{p,in}$为蓄能泵输入功率，kW；η_p为蓄能泵效率；H_p为工作扬程，m。蓄能泵特征流量主要有蓄能泵最大流量$Q_{p,max}$和蓄能泵最小流量$Q_{p,min}$两种，分别为在规定的运行扬程范围内及额定转速下蓄能泵输出的最大或最小流量。

shuili jixie moxing shiyan

水力机械模型试验　(model test of hydraulic machinery)

根据水力机械相似理论，用水力机械模型在专门的试验装置上进行的用以判断原型的各种参数和性能的试验。工程中对大中型水力机械一般可采用模型试验方式验收原型的性能。在新型水力机械研制过程中，往往采用模型试验与理论计算相互验证、反复修改的方式，逐步提高水力机械的性能水平。

水力机械模型　用以判断原型的性能，其通流部分与原型几何相似，包括水力机械进口至出口的全部通流部件。例如，水轮机模型包括从进水管、蜗壳、导水机构（或针阀）、转轮到尾水管标准段末端的全部模型段，其中转轮是能量转换的关键部件，对各项特性的影响最大。对验收试验或重要的模型试验，为保证试验成果可靠，水力机械模型转轮（叶轮）公称直径D_1一般根据模型试验装置的试验能力选取较大值，通常D_1不小于0.35m。

模型试验项目　主要有效率、空化、飞逸、压力脉动、轴向水推力、导叶水力矩等。

效率试验　对水轮机（或水泵水轮机的水轮机工况），测定不同工况下水轮机转轮输出功率与输入的水流功率，其比值即为水轮机水力效率，用η_{hyd}表示

$$\eta_{hyd}=\frac{P_{run,out}}{P_{in}}=\frac{M\omega}{\gamma QH}=\frac{\pi}{30}\times\frac{Mn}{\gamma QH} \tag{1}$$

式中$P_{run,out}$为水轮机转轮输出的机械功率，kW；P_{in}为水轮机的输入水流功率，kW；M为水轮机转轮扭矩，N·m；ω为角速度，rad/s；γ为水的重度，一般为$9.81kN/m^3$；Q为流过水轮机的流量，m^3/s；H为试验水头，m；n为水轮机的转速，r/min。

对蓄能系（或水泵水轮机的泵工况），测定不同工况下蓄能泵输出的水流功率与叶轮输入功率，其比值即为蓄能泵水力效率，用 $\eta_{p,hyd}$ 表示

$$\eta_{p,hyd}=\frac{P_{p,out}}{P_{imp,in}}=\frac{\gamma Q_p H_p}{M_p \omega}=\frac{30}{\pi}\times\frac{\gamma Q_p H_p}{M_p n} \qquad (2)$$

式中 $P_{p,out}$ 为蓄能泵输出的水流功率，kW；$P_{imp,in}$ 为蓄能泵叶轮的输入机械功率，kW；γ 为水的重度，一般为 $9810N/m^3$；Q_p 为流过蓄能泵的流量，m^3/s；H_p 为试验扬程，m；M_p 为蓄能泵叶轮力矩，N·m；ω 为角速度，rad/s；n 为蓄能泵的转速，r/min。

空化试验　测定不同工况下模型试验装置的电站空化系数（σ_p）与模型空化现象的关系，进而确定表征水轮机空化性能的空化系数所进行的试验。对水轮机或水泵水轮机的水轮机工况，通常采用改变模型尾水自由水面处绝对压力的方法改变模型试验装置的电站空化系数（σ_p）。σ_p 的表达式为

$$\sigma_p=\frac{p_{ab}-p_{va}-H_s}{H} \qquad (3)$$

式中 p_{ab} 为模型尾水自由水面处的绝对压力，以水柱高表示，m；p_{va} 为试验水温下的汽化压力，以水柱高表示，m；H_s 为吸出高度，m；H 为工作水头，m。

蓄能泵或水泵水轮机泵工况的空化性能也可采用空化系数表示，或者采用空化余量（net positive suction head，NPSH，净吸上扬程），即第一级叶轮进口处空化基准面的绝对压力与汽化压力之间的水柱差表示，试验方法与水轮机类似。

飞逸试验　测定水轮机（水泵水轮机的水轮机工况）处于失控状态，轴端负荷力矩为零时的稳态最高转速，即水轮机飞逸转速，用 n_{run} 表示。或测定当电动机断电时，蓄能泵（水泵水轮机的泵工况）处于失控状态，以水轮机方向旋转的稳态最高转速，即蓄能泵（水泵水轮机的泵工况）反向飞逸转速，用 $n_{p,run}$ 表示。飞逸试验的结果一般都换算为转轮（叶轮）公称直径为 1m 和水头（扬程）为 1m 时的单位飞逸转速，用 $n_{run,11}$ 或 $n_{p,run,11}$ 表示，单位为 r/min，表达式为

$$n_{run,11}=\frac{n_{run}D}{\sqrt{H}} \qquad (4)$$

$$n_{p,run,11}=\frac{n_{p,run}D}{\sqrt{H_p}} \qquad (5)$$

式中 H 和 H_p 分别为工作水头和扬程，m；D 为转轮或叶轮公称直径，m。

压力脉动试验　测定在规定工况和电站空化系数（或其他特定电站空化系数）条件下，水力机械规定部位压力脉动幅值和频率的试验。试验结果中，频率以混频和分频形式表示，单位为 Hz；幅值一般以压力脉动 ΔH 的幅值与相应工作水头（扬程）H 比值的百分比 $\overline{A}$ 表示

$$\overline{A}=\frac{\Delta H}{H}\times 100\% \qquad (6)$$

式中 ΔH 为测得的压力脉动双振幅值，m。

其他试验项目　主要包括：①导叶力特性试验，即测量水流作用在导叶上的水力矩（包括大小和方向）与导叶开口、运行工况之间的关系；②叶片力特性试验，即测量水流作用在可调节转轮叶片上的水力矩（包括大小和方向）与叶片安放角、运行工况之间的关系；③水推力试验，即测量水流作用在转轮（叶轮）轴线方向的作用力；④水泵水轮机全特性试验；⑤蜗壳压差与过流量关系的测量。

模型试验装置　习惯上称为模型试验台，用以测量模型的水力效率、压力脉动、空化等水力机械模型特性，可分为开敞式和封闭式两种。一般封闭式试验装置能够以开敞方式运行，开敞式试验装置不能进行空化试验。蓄能泵性能试验要求模型试验装置的水流反向（相对于水轮机）流动，水泵水轮机全特性试验要求模型试验装置的水流可以双向流动，故习惯上将水流可以双向流动的封闭式试验装置称为通用试验台。

模型试验中，水头（扬程）效率试验时水头（扬程）的选择，对轴流式选用 5～10m，对混流式选用 20m 或以上，一般可满足精度要求。空化试验水头（扬程）一般选用 20～30m。由于提高水头（扬程）能更好地保证空化试验的精度，一些大型模型试验装置可将试验水头（扬程）提高到 60～80m，有的甚至超过 100m。通常采用效率综合误差表征模型试验装置的精度，模型试验装置的精度一般不应低于 0.3%。

shuili jixie nisha mosun

水力机械泥沙磨损

（hydraulic abrasive erosion of hydraulic machinery）　过机水流中较坚硬的悬移泥沙颗粒撞击和磨削水力机械过流表面材料，使其因疲劳和机械切削而剥落的过程。受泥沙磨损后，水力机械过流表面呈现的形态主要取决于水流绕流该部件的流动状态。一般磨损初期在过流表面出现沿水流方向的划痕或麻点，发展后出现沟槽状或波纹状痕迹，之后形成鱼鳞坑，严重时可造成过流部件穿孔。通常将水轮机泥沙磨损分为普遍磨损和局部磨损两类：①普遍磨损。磨损相对较均匀，面积较大，如水轮机转轮叶片表面的磨损多属此类。②局部磨损。由于过流部件表面不平顺的绕流引起的磨损，多表现为局部的凹坑或沟槽。

影响泥沙磨损强度的因素主要有水流、泥沙和材质等 3 个方面：

（1）水流特性。挟沙水流速度和方向是导致磨损的重要因素之一。理论上泥沙磨损量与流速的 3 次方成正比；对金属材料，磨损量与水流冲角成正比。

（2）泥沙特性。包括含沙量、泥沙成分、硬度、颗粒大小和形状，含沙量越大，泥沙越硬，如石英、褐铁矿、黄铁矿、石榴石等，粒径越大、沙粒形状越尖锐，磨损越重。

（3）材质特性。包括流道材料成分、金相组织和硬度等，一般以材料的耐磨系数划分耐磨性能的好坏，如以 ZG30 的耐磨系数为 1 比较，1Cr18Ni9Ti 板材为 1.2～1.8，ZG0Cr13Ni4Mo 为 1.2～2.0，20Cr5Cu 板材为 2.0～3.0，堆 642 电焊条（耐磨 1 号）为 4.0 及以上。

泥沙磨损破坏导致水轮机转轮、导叶、密封环、抗磨板等过流部件迅速损坏，效率急剧下降，甚至停机困难，电站损失大量电能，被迫提前检修，造成人力、物力的损失和浪费。同时，水轮机过流部件被磨损后，将加剧水流的局部扰动，促进空化的发展，进而使机组振动加剧。

减轻泥沙磨损危害的途径主要有：①改善流道内水流流动状态，如在结构设计上尽量避免在过流表面出现凹凹不平或狭窄间隙，提高水力机械制造质量，降低过流表面的表面粗糙度等。②尽可能选用抗磨损性能好的材料制作过流部件，或在过流表面易磨损部位采用抗磨损敷层。③合理选择

机型和工作参数。例如，在高含沙量电站，可选择轴流式和混流式两种机型时，选择混流式水轮机对减轻泥沙磨损危害较为有利；对过机含沙量较大的工程，不宜单纯强调水力机械的高性能指标；合理选择吸出高度，减弱或避免空蚀和泥沙磨损的联合作用。④结合电站工程，采用拦沙、沉沙、排沙等水工措施，合理确定取水口位置，尽量减少过机含沙量，避免推移质进入水轮机。⑤对水轮机的运行工况或方式作必要的限制，如尽量使机组在最优工况下运行；尽量避开沙峰运行；较长时间停机时，关闭进水闸门或水轮机进水阀。

泥沙磨损程度尚无公认的评定方法。宏观描述泥沙磨损危害程度通常是给出在一定运行条件下的机组大修周期或效率下降值。当需要定量描述泥沙磨损量时，一般采用与空蚀评定类似的方法进行，即给出因泥沙磨损造成的水力机械过流表面金属失重量（体积）、损坏表面面积或最大侵蚀深度。实践中往往不能将泥沙磨损量和空蚀量严格地区分开来，故一般将它们合并考虑（见水力机械空化和空蚀）。

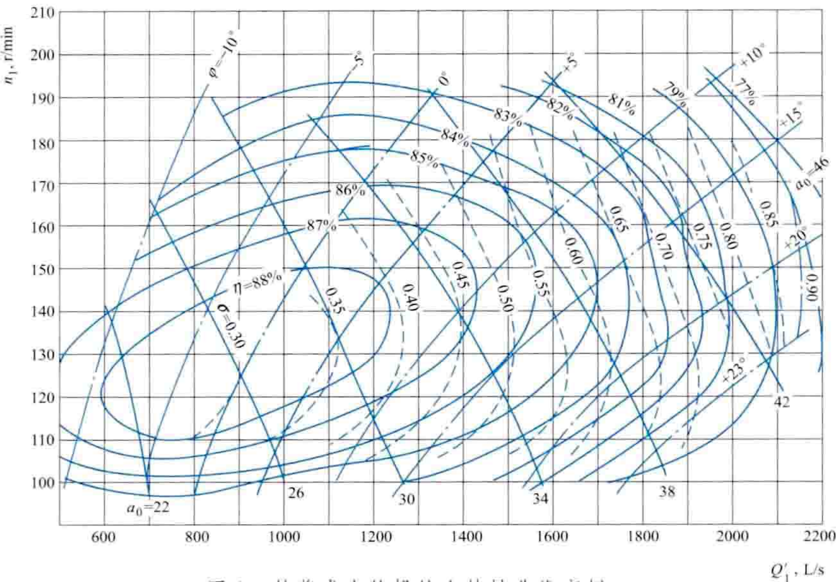


图 1　转桨式水轮机综合特性曲线实例

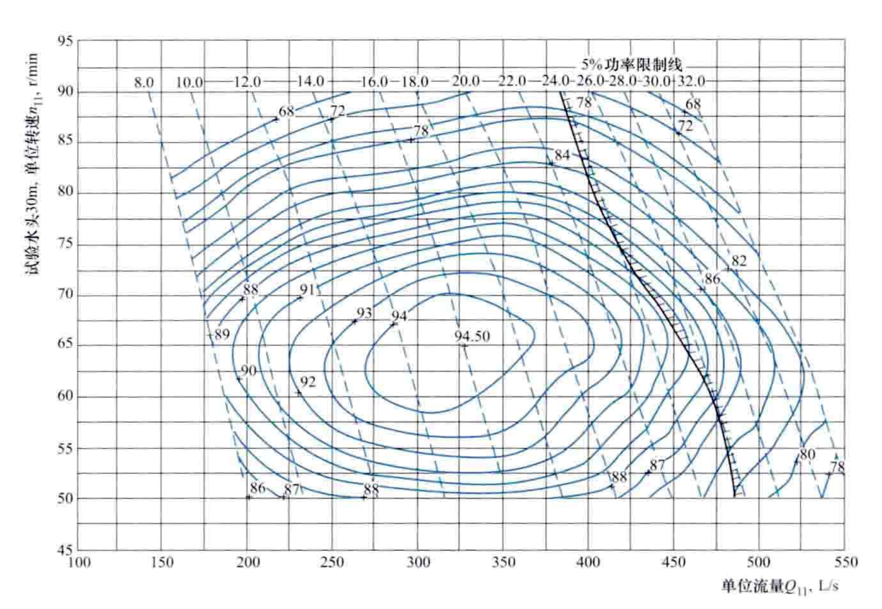


图 2　混流式水轮机综合特性曲线实例

shuili jixie texing quxian

水力机械特性曲线

(characteristic curve of hydraulic machinery)　表征水力机械特性参数间关系的曲线。常见的水力机械特性曲线有水轮机综合特性曲线、水轮机运转特性曲线、飞逸特性曲线以及水泵水轮机全特性曲线等。

水轮机综合特性曲线　以单位流量和单位转速为坐标系给出的几何相似水轮机的效率、空化系数、导叶开度、叶片角度和压力脉动等的等值曲线。水轮机综合特性曲线应用比较广泛，通过它可以判断水轮机各参数间的关系，了解水轮机的性能，计算水轮机的工作参数，绘制水轮机运转特性曲线等，习惯上也称为模型特性曲线。水轮机综合特性曲线通常是根据模型水轮机试验资料建立的，故习惯上称为水轮机模型特性曲线。转桨式和混流式水轮机综合特性曲线分别见图 1、图 2。

混流式和定桨式水轮机不能在最大单位功率 $P_{11,\max}$ 点运行，因为此时一旦外负荷稍有增加，水轮机输出功率反而降低，将进入不稳定状态。因此，混流式或定桨式水轮机综合特性曲线中通常绘有一条功率限制线，表示水轮机只能在其限定的范围以内运行。一般该功率限制线较最大单位功率留有 5% 的功率裕量，故习惯上称其为 5% 功率限制线。

对转桨式水轮机，只有保持导叶和桨叶之间的协联关系才能体现正常运行时水轮机的特性。因此，转桨式水轮机综合特性曲线通常是在导叶和桨叶保持协联的条件下绘制的，一般不再绘制固定桨叶角度下（相当于定桨式水轮机）的等效率曲线和等开度曲线。

水轮机运转特性曲线　以水轮机输出功率和水头为坐标系给出的水轮机效率、吸出高度等的等值曲线。水轮机运转特性曲线一般针对具体工程的特定水轮机，根据水轮机综合特性曲线绘制，同时标出水轮机运行水头、功率范围。工程设计中，水轮机运转特性曲线主要用于评定所选水轮机的实际运行性能、进行水能计算等。水电站建成后，水轮机运转特性曲线是指导运行的基础资料之一。某水电站水轮机运转特性曲线见图 3。

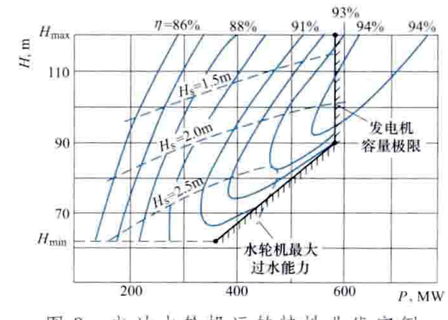
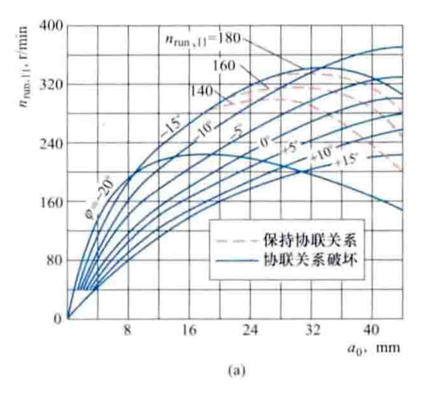


图 3　电站水轮机运转特性曲线实例

飞逸特性曲线　以导叶开度和单位飞逸转速为坐标系的关系曲线，通常根据模型飞逸试验结果绘制。工程设计中，飞逸特性曲线主要用于确定水力机械的飞逸转速，是水力机械和电机结构设计的基础资料。水轮机飞逸特性曲线见图 4。



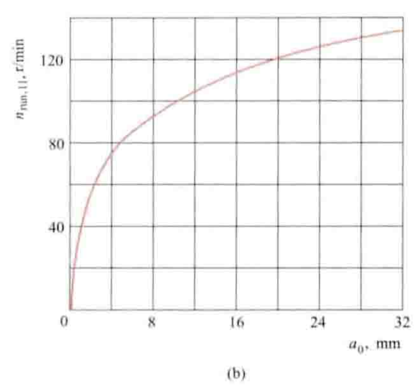


图 4　水轮机飞逸特性曲线实例

(a) 轴流转桨式水轮机；(b) 混流式水轮机

水泵水轮机全特性曲线　有流量全特性曲线和力矩全特性曲线两种。流量全特性曲线是以单位转速和单位流量为坐标系，各导叶开度下的关系曲线；力矩全特性曲线是以单位转速和单位力矩为坐标系，各导叶开度下的关系曲线。一般定义水轮机工况的转速方向、流量方向、力矩方向为正方向，即此时的转速、流量、力矩取正值，反之取负值。全特性曲线一般根据水泵水轮机全特性试验结果绘制，反映水泵水轮机正转、反转，正向流动、反向流动，输出功率、输入功率以及正向制动、反向制动等情况下的全面特性。在工程上，水泵水轮机全特性曲线主要用于性能比较、选型以及水力过渡过程计算等。

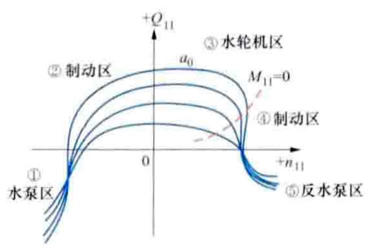


图 5　水泵水轮机流量全特性曲线示意

在流量全特性曲线图上，一般还绘有一条单位力矩为零的曲线，该曲线与两条坐标轴一起将流量全特性曲线分为 5 个区域，按顺序分别为水泵区、反向制动区、水轮机区、正向制动区和反水泵区，见图 5。在力矩全特性曲线图上，一般还绘有两条单位流量为零的曲线，这两条曲线与两条坐标轴一起将力矩全特性曲线也分为 5 个区域，这 5 个区域的名称、排列顺序、物理意义与流量全特性图上的 5 个区域完全相同，见图 6。水泵水轮机上述 5 个工况区的各参数方向见表。

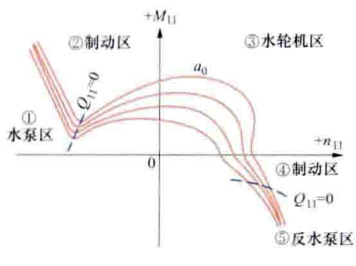


图 6　水泵水轮机力矩全特性曲线示意

水泵水轮机 5 个工况区各参数方向表

工况	单位流量（Q_{11}）	单位转速（n_{11}）	单位力矩（M_{11}）
水泵区	负	负	负
反向制动区	正	负	负
水轮机区	正	正	正
正向制动区	正	正	负
反水泵区	负	正	负

shuili jixie xiangsi lilun

水力机械相似理论

(similarity theory of hydraulic machinery)　研究不同尺寸水力机械（习惯上称为原型和模型）相似关系成立的条件，以及满足相似条件下原型和模型之间各种特性参数的相互关系，习惯上也称为水轮机相似理论。根据水力机械相似理论，确定模型尺寸及试验条件，进行模型试验，并由试验结果换算出水力机械单位参数、比转速，得到水力机械特性曲线，以指导原型的设计和制造，或对原型的水力性能进行验收。模型和原型相似，必须满足几何相似、运动相似和动力相似 3 个条件。

几何相似　水力机械模型和原型过流表面对应角相等且各对应尺寸成相同比例。如原型和模型水轮机的转轮、导叶（见导水机构）、蜗壳、尾水管等各部分的形状相似、叶片数相同、叶片安放角度相等和各线形尺寸成相同比例，见图 1。转轮和导叶相似的关系为

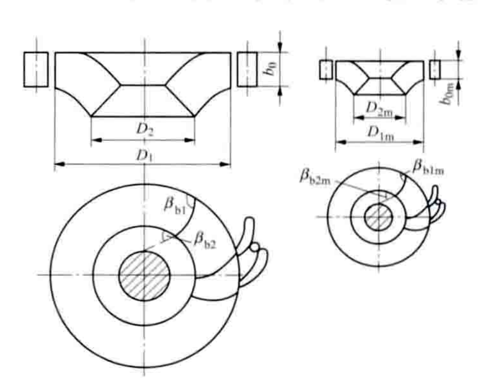


图 1　转轮和导叶几何相似

$$\frac{D_1}{D_{1m}}=\frac{D_2}{D_{2m}}=\frac{b_0}{b_{0m}}=\frac{a_0}{a_{0m}}=\lambda \tag{1}$$

$$\beta_{b1}=\beta_{b1m} \tag{2}$$

式中 D_1、D_2 分别为原型转轮的进、出口直径；D_{1m}、D_{2m} 分别为模型转轮的进、出口直径；b_0、b_{0m} 分别为原型和模型导叶的高度；a_0 和 a_{0m} 分别为原型和模型导叶的开度；λ 为尺寸比例系数；β_{b1} 和 β_{b1m} 分别为原型和模型转轮叶片的进口角。各参数的单位一致，一般采用国际单位制。

运动相似　模型和原型流道中各相应液流质点方向相同、大小成比例，即各相应点水流质点的圆周速度、相对速度和绝对速度所构成的速度三角形相似（见图 2），见式（3）～式（5）

$$\frac{u_1}{u_{m1}}=\frac{v_1}{v_{m1}}=\frac{w_1}{w_{m1}} \tag{3}$$

$$\alpha_1=\alpha_{1m} \tag{4}$$

$$\beta_1=\beta_{1m} \tag{5}$$

式中 u_1、u_{1m} 分别为原型和模型转轮（叶轮）进口的圆周速度，m/s；v_1、v_{1m} 分别为原型和模型转轮进口的绝对速度，m/s；w_1、w_{1m} 分别为原型和模型转轮（叶轮）进口的相对速度，m/s；α_1、α_{1m} 分别为原型和模型转轮（叶轮）进口绝对速度与圆周速

度的夹角；β_1、β_{1m}分别为原型和模型转轮（叶轮）进口相对速度与圆周速度的夹角。

动力相似　模型水轮机和原型水轮机流道中各相应点上水流质点所受的压力、惯性力、黏滞力和重力等方向相同，大小成比例。动力相似的条件下，雷诺数 Re、弗劳德数 Fr、斯特劳哈尔数 Sr、欧拉数 Eu 等相等。

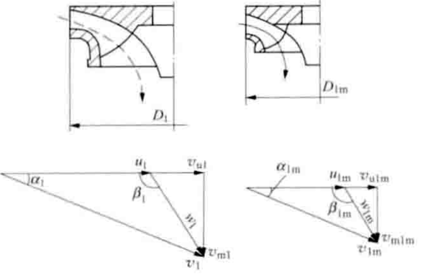


图 2　速度三角形相似

shuili jixie xiaolü

水力机械效率　(efficiency of hydraulic machinery)

水力机械输出功率与输入功率之比。水力机械在实现水流机械能与旋转机械能的相互转换过程中存在能量损失，损失形式有容积损失、水力损失、机械损失 3 种。

容积损失为旋转部件与固定部件间的间隙泄漏产生的流量损失。水力损失为水流在流动过程中因沿程摩擦、漩涡、脱流等引起的损失。机械损失为机械摩擦和转轮在空气中（冲击式）旋转引起的损失。全部计入上述 3 项损失的效率称为水力机械效率，仅计入容积损失、水力损失的效率称为水力机械的水力效率，仅计入机械损失的效率称为水力机械的机械效率。设计中采用的效率和模型试验中测量的效率一般指水力机械的水力效率，而原型试验测量的效率一般为水力机械效率。理论上，水力机械效率小于水力机械的水力效率。但一般情况下，特别是大中型水力机械的机械损失相对比重较小，水力机械效率与水力机械的水力效率的数值基本相当，故在水电站工程设计中往往习惯将它们统称为水力机械效率。

水力机械效率不仅反映转轮（叶轮）的效率，也包含了水力机械流道的水力损失，但不包括水电站输水系统中的水力损失。实测效率时，反击式水轮机、水泵水轮机计入从蜗壳进口（或水轮机进水口）到尾水管出口的水力损失；冲击式水轮机计入从针阀引水管进口到水斗出口的水力损失；蓄能泵计入从吸水管进口到蜗室出口（或蓄能泵出水口）的水力损失。

不同型式的水力机械因结构和运行工况不同，损失和效率各异。例如，冲击式水轮机随流量变化的效率曲线一般较平缓，但最高效率偏低；混流式水轮机的最高效率较高但低负荷的效率较低；轴流定桨式水轮机的最高效率略高于转桨式，但偏离最优工况后效率急剧下降；轴流转桨式水轮机因具有双重调节机构，其效率曲线较定桨式及混流式水轮机平缓。各型水轮机在水头 H、转速 n 恒定条件下的 $P-\eta$ 曲线如图 1 所示。

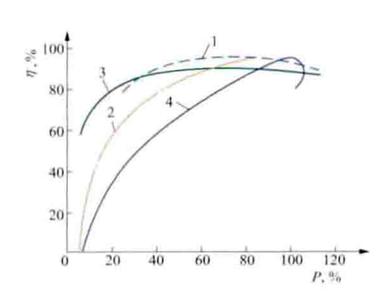


图 1　不同型式水轮机效率曲线

1—转桨式，$n_s=625$；2—混流式，$n_s=300$；3—水斗式，$n_s=20$；4—定桨式，$n_s=570$

水力机械的效率可根据其模型的效率用相似理论公式换算得到，也可以在水电站经实际测量得到。混流式水轮机、轴流式水轮机的真机和模型间的效率存在差异，冲击式水轮机真机和模型效率基本相同。

按照模型试验得到的水轮机综合特性曲线绘制水轮机运转特性曲线图或计算水轮机的各项与水头有关的数据时，必须考虑效率、流量、转速等修正的影响，为了简化计算工作，一般令

$$\eta_t = \eta_m + \Delta\eta \tag{1}$$

$$Q_t = (Q_{11} + \Delta Q_{11})D^2\sqrt{H_t} \tag{2}$$

$$H_t = n_N D/(n_{11} + \Delta n_{11})^2 \tag{3}$$

$$P_t = 9.81 Q_t H_t \eta_t \tag{4}$$

式中 η、$\Delta\eta$ 分别为效率和效率修正值；Q_{11} 和为模型水轮机单位流量，m^3/s；n_{11} 为单位转速，r/min；n_N 为水轮机额定转速，r/min；D 为转轮直径，m；H 为水轮机水头，m；下标 t 表示原型水轮机，下标 m 表示模型水轮机。

水力机械特征效率　包括最高效率、额定效率、加权平均效率。以水轮机为例：

(1) 水轮机最高效率 (η_{max})。水轮机在其运行范围内具有的最大效率值，如图 2 中的 A 点。

(2) 水轮机额定效率 (η_N)。水轮机在额定转速、额定水头下发出额定功率时的效率，如图 2 中的 B 点。

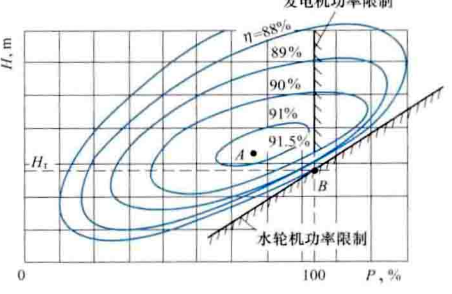


图 2　水轮机运转综合特性曲线

(3) 水轮机加权平均效率 (η_w)。水轮机在加权平均水头或几个代表性水头下按照电站运行负荷图计算得出的电能加权平均效率，其计算公式为

$$\eta_w = \frac{\omega_1\eta_1 + \omega_2\eta_2 + \omega_3\eta_3 + \cdots}{\Sigma\omega_i} = \frac{\Sigma\omega_i\eta_i}{\Sigma\omega_i} \tag{5}$$

式中 η_i 为不同水头、不同负荷百分比之下的水轮机效率；ω_i 为各相应效率点的电能加权因子。

实测水力机械效率　在水电站实测水轮机（水泵水轮机的水轮机工况）效率 η 和蓄能泵（水泵水轮机的泵工况）效率主要需测定工作水头 H 或扬程 H_p、流经水力机械的流量 Q 或 Q_p 以及轴输出功率 P_{out} 或轴输入功率 $P_{p,in}$。工作水头或扬程多用高精度压力表测定。流量测定方式很多，有测流堰法、流速仪法、盐幕法、水锤法、超声波法、电磁法、文丘里法和热力学法等，其中超声波法和电磁法的测量精度较高，当水头大于 300m 时，热力学法的精度也很高。输入功率或输出功率多是在机组主轴上安装扭矩应变片测量扭矩，进而通过计算求得。

对于水轮机（水泵水轮机的水轮机工况）

$$\eta = \frac{P_{out}}{9.81QH} \tag{6}$$

对于蓄能泵（水泵水轮机的泵工况）

$$\eta_p = \frac{9.81Q_pH_p}{P_{p,in}} \tag{7}$$

各型水力机械的效率已达到很高水平。例如，大中型水轮机的最高效率，轴流式已达到95%以上，混流式已达到96%以上，冲击式在93%左右。

shuili jiance xitong

水力监测系统

（supervisory control and data acquisition system）　为监视和测量与水电站机组设备运行有关的参数而设置的系统。其目的是实现水电站的安全、稳定、高效运行，通常分为全厂性测量和机组段测量。全厂性测量项目包括电站的上、下游水位，毛水头，水库水温，拦污栅前后压差等。机组段测量项目包括蜗壳进口和尾水管出口压力、水轮机净水头和流量、水轮机各过流部位（包括蜗壳、尾水管、导叶前后、顶盖、止漏环等）的压力和压力脉动、主轴摆度和机组振动值等。

利用水位信号计可分别测得上、下游水位，其差值即电站的毛水头。水轮机净水头多用高精度压差计测量；流量多在进水管、蜗壳或喷管等处装差压计测量，并以流速仪、超声波流量计、电磁流量计或热力学法进行率定；大型机组一般配置超声波流量计。将水头、流量、发电机功率等参数输入计算机即可求得机组效率。

必要时，对具有长压力钢管和设有明管的水电站还需装设钢管爆破监测装置，其工作原理是：在钢管的首端或首末两端装设流量计，一旦出现钢管内流量超过额定流量的10%～30%，或首末两端流量差大于10%的情况，该装置将自动发出警报信号或紧急关闭钢管进口闸门。中国以礼河三级电站采用了此项保护装置。此外，为及时发现水淹厂房事故征兆，一些水电站在厂房底层适当位置装设了电极式水位计，当地面积水到达设定位置时，发出报警信号。

shuili pojiang

水力坡降

（hydraulic gradient）　河流或地下水水流面单位距离的水位差。用于衡量河流或地下水流的势能变化情况。

在水文地质勘察中，常根据泉水出露点高程或钻孔揭露含水层地下水位计算潜水面地下水力坡降，利用水力坡降分析岩体的透水性、溶蚀程度及含水层间的水力联系。在河谷岸坡内，地下水水力坡降变化规律一般是上部较小（缓），中部大（陡），河床附近变小（平缓）。在岩溶地区河谷中受河流的侧向溶蚀作用与风化、卸荷等影响，常在河水位附近形成几十至几百米不等的地下水位低平带，与河水位基本持平，水力坡降近于零，低平带越宽，反映河床附近岩溶越发育，岩体透水性越强，需加强坝基防渗处理。

在水电工程中，地下水水力坡降常用来评价岩土体的抗渗稳定性能。将岩土体中产生渗透变形时的水力坡降称为临界水力坡降，它可以通过室内或现场钻孔渗透试验测定。渗透变形是指渗透水流使岩土体中的某些颗粒移动或颗粒成分、结构发生改变的现象。为了防止坝（地）基发生渗透破坏，采用临界水力坡降除以1.5～2.0的安全系数获得允许水力坡降［J］，作为地基岩土体抗渗稳定设计指标。工程中常采用防渗帷幕、水平铺盖等措施延长渗径，防止地基渗透破坏。无黏性土容许水力坡降经验值见下表。

无黏性土允许水力坡降经验值表

允许水力坡降	渗透变形形式					
	流土型			过渡型	管涌型	
	$c_u \leqslant 3$	$3 < c_u \leqslant 5$	$c_u > 5$		级配连续	级配不连续
［J］	0.25～0.35	0.35～0.50	0.50～0.80	0.25～0.40	0.15～0.25	0.10～0.20

注：1. 本表不适用于渗流出口有反滤层情况。若有反滤层作保护，则可提高2～3倍。
2. c_u 为土的不均匀系数。

shuilixue

水力学

（hydraulics）　研究水的平衡和机械运动规律及其应用的学科，是流体力学的一个分支。它广泛应用于水利水电工程建设、城乡建设和环境保护、船舶航运、机械制造、石油开采和运输、金属冶炼及化学工业等部门。

研究内容　分为水静力学和水动力学两部分。水静力学研究水在静止状态下平衡规律和静水压强的分布规律。在水电站建设中需根据水静力学的理论计算大坝上游水的推力及闸门所承受的水压力。水动力学主要研究水体流动的基本规律，包括反映质量、能量和动量三大守恒定律的连续方程、能量方程和动量方程以及水流阻力和机械能损失的理论。对于不可压缩一维恒定总流，上述3个方程的形式为：

连续方程　$$Q = v_1A_1 = v_2A_2 \tag{1}$$

能量方程　$$Z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} + h_{w(1-2)} \tag{2}$$

动量方程　$$\Sigma F_i = \rho Q(\alpha_{02} v_{2i} - \alpha_{01} v_{1i}) \tag{3}$$

式中 Q 为通过液流断面的流量；v_1、v_2 及 v_{1i}、v_{2i} 为1、2断面的平均流速及其在 i 方向的分量；A_1、A_2 为1、2断面处过水断面的面积；Z_1、Z_2 为1、2断面形心点的高度；p_1、p_2 为1、2断面形心点处的压强；γ 为水的重度；g 为重力加速度；α_1、α_2 及 α_{01}、α_{02} 分别为1、2断面的动能修正系数及动量修正系数；$h_{w(1-2)}$ 为两断面间的能头损失；ρ 为水的密度。

在工程技术领域根据水流运动的不同类型，水动力学的研究内容主要分为管道水力学和明渠水力学。管道水力学主要研究管道有压流的过水能力和水流阻力以及管道阀门突然启闭引起的管道内水压力的变化。例如，水电站有压隧洞、高压管道、城市供水管路系统的水流，以及水电站甩负荷引起的水击等，都属于管道水力学问题。明渠水力学主要研究具有自由水面的水流运动，如河道、水库和渠系的水流，孔口出流、堰流、波浪、水跃、水射流及高速水流等。反映明渠水流的主要因素是水位（或水深）和流量（或流速）。水位和流量不随时间变化的水流称为明渠恒定流，其基本方程为伯努利方程（见明渠水力学）。水位和流量随时间变化的水流称为明渠不恒定流，其一维总流的基本方程为圣维南方

程。水利水电工程中常见的明渠水力学问题有：①水库回水及洪水调节问题；②河道洪水演进及水电站日调节下游河道不恒定流；③溢洪道泄洪消能问题；④高速水流引起的空化、空蚀及其防止措施等。

按专业领域水力学还可分为河流水力学、水工建筑物水力学、河口海岸水力学、地下水水力学、工业水力学和水力机械水力学等分支。

研究方法　分为理论分析、模型试验和原型观测。①理论分析。根据水流运动的基本规律建立理论方程及数学模型，求其解析解或用数值计算方法借助计算机求近似解。由于水流运动十分复杂，在建立方程时常需进行适当概化，如假定水是不可压缩的，水的黏滞性应力符合牛顿摩擦定理等。②模型试验。根据相似原理，模拟实际水流条件，由模型得出的数据推算原型情况。模型试验可以有控制地进行系统研究，但存在缩尺影响。③原型观测。对天然河流或已建工程现场观测取得真实资料进行分析，没有比尺影响，但难以在控制条件下作系统研究。对于复杂的水力学问题常用几种方法结合进行研究。

简史及发展　水力学的萌芽可以追溯到很早的时代。公元前250年左右阿基米德（Archimedes，公元前287—公元前212）提出的浮体原理，是水力学发展史上最早的记载。公元前256年左右中国修建了都江堰，表明对明渠水流和堰流已有一定认识。

16世纪以后水力学有了重要发展。例如，水静力学中引用了刚体静力学的方法研究液体的平衡；B. 帕斯卡（B. Pascal，1623—1662）提出液体中压力传递的定理；E. 托里切利（E. Torricelli，1608—1647）提出孔口泄流公式；I. 牛顿（I. Newton，1643—1727）提出流体的摩擦定律。至1738年D. 伯努利（D. Bernoulli，1700—1782）提出水动力学的能量方程后，水力学才初步形成一门独立的学科。20世纪以来，世界各国水力学家运用现代实验技术，以相似理论和量纲分析的实验理论为基础，同时也吸取了流体力学的基本理论来分析水流现象，使实验工作具有较为牢固的理论基础。

20世纪50年代以来，中国在明渠不恒定流、高速水流及泄洪消能防冲等方面的研究，取得了显著的成果。随着生产建设的发展，高坝和大型水电站的修建，海洋的开发和环境污染的防治等，不断对水力学提出新的要求；现代流体力学的进展渗透入水力学更多新的理论和方法；现代量测技术（如激光、热膜、同位素、微机控制、粒子示踪、摄像、图像处理以及各种电子仪器以及遥感技术）的引用，使对复杂流动和水流内部结构的量测成为可能；电子计算机的广泛应用解决了许多过去难以计算的问题。这些进展使水力学的研究从一维流动为主，扩展到二维、三维流动，从等密度发展到变密度、变温度流动，从单相流动扩展到多相流动（如挟沙水流），从初期的水量研究扩展到水质研究。由于服务领域和研究方法的发展，除传统的水力学分支外，又崛起一批新的学科分支，如计算水力学、随机水力学、环境水力学、高速水力学、电站水力学、工业水力学和水力信息学等。

参考书目

夏震寰．现代水力学．北京：高等教育出版社，1990．

shuiliu xieshali

水流挟沙力　(sediment transport capacity)　在一定的水流和泥沙综合条件下，水流能够携带的悬移质中的床沙质的临界含沙量。当悬移质中的床沙质含沙量超过这一临界数量时，河床发生淤积；反之，当不足这一临界数量时，水流将向床面层寻求补给，河床发生冲刷。这种淤积或冲刷，使悬移质中的床沙质含量恢复临界数值，达到不冲不淤的新的平衡状态。悬移质挟沙力的研究主要有扩散理论和重力理论，按此导出的挟沙力公式以H. A. 爱因斯坦（H. A. Einstein）公式和M. A. 维利坎诺夫（M. A. Великанов）的公式较有代表性。

爱因斯坦公式

$$g_s = 11.6\gamma_s u_* S_{va} a\left[2.303\log\left(\frac{30.2h}{\Delta}\right)I_1 + I_2\right]$$

$$I_1 = 0.216\frac{A^{Z-1}}{(1-A)^Z}\int_A^1\left(\frac{1-y}{y}\right)^Z dy$$

$$I_2 = 0.216\frac{A^{Z-1}}{(1-A)^Z}\int_A^1\left(\frac{1-y}{y}\right)^Z \ln y dy$$

$$A = \frac{a}{h}, Z = \frac{\omega}{Ku_*}$$

式中 g_s 为悬移质单宽输沙率；γ_s 为泥沙的容重；u_* 为剪力速度；S_{va} 为悬移质在高程 a 处的体积比含沙量；h 为水深；Δ 为边壁粗糙度；y 为距床面的高程；K 为待定系数；ω 为颗粒沉速。

维利坎诺夫公式

$$S_{vm} = K\frac{u^3}{gh\omega}$$

式中 S_{vm} 为以体积比计的水流挟沙力；K 为待定系数；u 为断面平均流速；g 为重力加速度；h 为水深；ω 为颗粒沉速。

由于影响水流挟沙力因素的复杂性，现有理论公式在计算天然河流时还有相当大的偏差。在实际工程计算中，常利用一些经验性或半经验性的挟沙力公式，其中应用较为广泛的有武汉水利电力学院公式

$$S_* = K\left(\frac{u^3}{gh\omega}\right)^m$$

式中 S_* 为以质量计的悬移质水流挟沙力；K、m 分别为待定系数和指数；u 为断面平均流速；g 为重力加速度；h 为水深；ω 为颗粒沉速。

恩格隆-汉森（Engelund-Hansen）公式

$$f\varphi_T = 0.3\Theta^2\sqrt{\Theta^2 + 0.15}$$

$$\varphi_T = \frac{g_T}{\gamma_s}\left(\frac{\gamma}{\gamma_s - \gamma}\right)^{1/2}\left(\frac{1}{gd^3}\right)^{1/2}$$

$$\Theta = \frac{\gamma}{\gamma_s - \gamma}\times\frac{(u_* d/v)^2}{gd^3/v^2}$$

式中 f 为达西-韦斯巴赫阻力系数；g_T 为包括推移质及悬移质在内的全部床沙质单宽输沙率；γ_s、γ 分别为泥沙和清水的容重；g 为重力加速度；d 为泥沙颗粒粒径；u_* 为摩阻流速；v 为水流流速。

考虑到水流中高含沙对浑水容重和沉降速度的影响，以及泥沙颗粒周围一层难以分离的薄膜水对泥沙颗粒体积的影响，韩其为给出了高低含沙水流统一的挟沙能力公式

$$S^* = K\left[1+\left(\frac{\rho_s-\rho}{\rho\rho_s}\right)\frac{S}{\beta}\right]^m \frac{1}{\left(1-\frac{S}{\beta\rho_s}\right)^{(k+1)m}}\left(\frac{U^3}{h\omega}\right)^m$$

$$\beta = \left(\frac{D}{D+2\delta}\right)^3$$

式中 K、m 分别为系数和指数；ρ、ρ_s 分别为清水和泥沙密度；ω 为清水时的泥沙沉速；k 为沉降速度修正指数，一般情况下 $k=7.0$；D 为泥沙颗粒粒径；δ 为薄膜水厚度，可取为 4×10^{-7}m。实际计算时，右边项中的含沙量 S 可取为挟沙能力 S^*，而 ρ 可取为 0.5。

通过水力学关系建立起来的悬移质挟沙力公式，只能计算悬移质中属于床沙质的输沙率，因此，在估算悬移质全沙输沙量时，需将冲泻质包括在内，冲泻质来量取决于流域的补给条件，与水力因子缺乏明确的关系，必须依靠野外实测资料的分析来确定。

参考书目

张瑞瑾，谢鉴衡．河流泥沙动力学．北京：水利电力出版社，1989.

shuiliu zuli

水流阻力

(flow resistance)　水体与固体边界有相对运动时，由边界压力差和摩擦应力产生的与运动方向相反的作用力。水流阻力分为物面摩擦阻力（沿程阻力）和形状压差阻力（局部阻力）两类。

物面摩擦阻力（沿程阻力）　与物面状况（壁面糙度 k_s）、当地流速（v）、水力半径（R）和流程长度（L）及重力加速度（g）有关，在水力学中用沿程水头损失 h_f 表示，即

$$h_f = \lambda\frac{L}{4R}\times\frac{v^2}{2g}$$

式中阻力系数 λ 是雷诺数（Re）和壁面相对糙度（k_s/D 或 k_s/R）的函数，$\lambda=f(Re, k_s/D)$，由管道（直径 D）中进行的系统性实验资料给出，如图 1 所示。阻力系数 λ 视水流流态是层流还是紊流而不同，紊流状态又分为水力光滑、水力粗糙和过渡区 3 种情况，见表。物面阻力有时用边壁阻力 τ_0 表示，它与 λ 的关系是

$$\tau_0 = \frac{\lambda}{8}\rho v^2$$

明渠水力学计算常用谢才（Chezy）系数 C 表示河渠阻力，它与 λ 的关系是

$$C=\sqrt{\frac{8g}{\lambda}}$$

流态特征与阻力系数关系表

流动形态	流动特征	阻力系数	备注
层流	$Re<2320$	$\lambda=64/Re$	水头损失与流速一次方成正比
紊流	水力光滑区 $\frac{u_*\Delta}{\nu}<5$	$\lambda=0.3164/Re^{1/4}$ 或 $\frac{1}{\sqrt{\lambda}}=2\log(Re\sqrt{\lambda})-0.8$	
	过渡区 $5<\frac{u_*\Delta}{\nu}<70$	$\frac{1}{\sqrt{\lambda}}=1.74-2\log\left(\frac{\Delta}{r_0}+\frac{18.7}{Re\sqrt{\lambda}}\right)$	
	水力粗糙区 $\frac{u_*\Delta}{\nu}>70$	$\lambda=\frac{1}{\left[2\log\left(3.7\frac{d}{\Delta}\right)\right]^2}$ 或 $\lambda=\frac{1}{\left(2\log\frac{r_0}{\Delta}+1.74\right)^2}$	水力损失与流速二次方成正比

注：表中 r_0 和 d 分别为管道半径和直径；Δ 为物面糙高；$u_*=\sqrt{\tau_0/\rho}$ 为壁面剪流速，其中 ρ 为水的密度。

图 1　物面阻力系数 λ 与雷诺数 Re 的关系（管道试验）

形状压差阻力（局部阻力）　流场固体边界形状改变处，对水流增加了约束，形成前后压力差，如水电站进水口、阀门段、弯道、泄水管出口突扩等，使通过的水流除物面阻力外，又增加了局部形状阻力，水力学中用局部水头损失表示，即

$$h_j=\zeta\frac{v^2}{2g}$$

式中局部水头损失系数 ζ 因具体形状而不同，通常由实验测定。水中运动的物体、水工建筑物中的闸墩，因绕流边界层分离形成尾流，产生很大的压差阻力 F_D，表示为

$$F_D=C_D\frac{\rho v^2}{2}A$$

式中 A 为与运动方向正交的物体投影面积；C_D 为形状阻力系数。几种典型物体三维绕流情况下的 C_D 值，如图 2 所示。物体（如船舶）在水面运动产生波系引起的阻力，称为波阻，它与物体形状和运动速度有极复杂的关系（见波浪）。

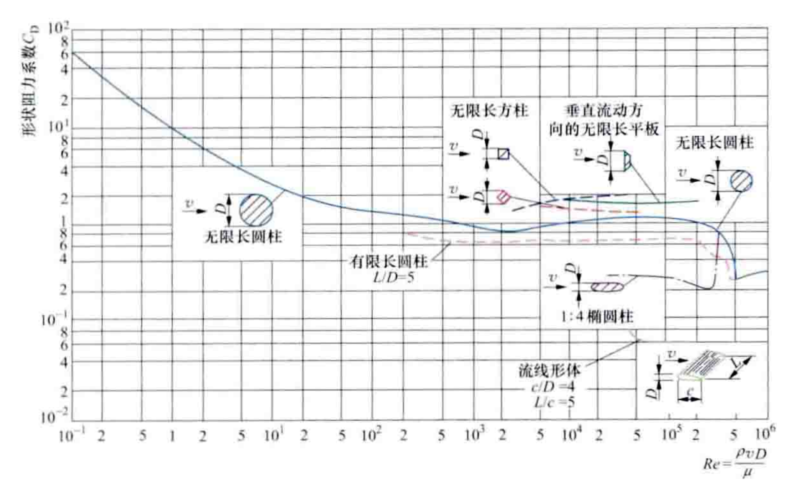


图 2 三维绕流物体形状阻力系数 C_D 与雷诺数 Re 的关系

shuilun fadianji

水轮发电机 (hydro-generator) 用水轮机驱动，将机械能转换为电能的交流同步电机。水轮发电机按其转轴的布置方式，可分为立式水轮发电机和卧式水轮发电机两种。一般小型机组以及贯流式水轮机或冲击式水轮机驱动的水轮发电机采用卧式结构。贯流式水轮机驱动的水轮发电机又称灯泡式水轮发电机。混流式水轮机或轴流式水轮机驱动的大、中型水轮发电机为立式结构。立式水轮发电机按其推力轴承布置位置的不同，又可分为悬式和伞式两种不同型式。推力轴承布置在转子上部的统称悬式水轮发电机。推力轴承布置在转子下部的统称伞式水轮发电机。伞式又可分为全伞式和半伞式两种：在转子上部无导轴承的为全伞式，有导轴承的为半伞式。

运行方式 水轮发电机通常有发电、调相和进相 3 种运行方式。发电运行时输出有功功率及无功功率；调相运行时吸收少量有功功率，输出无功功率；进相运行时输出有功功率，吸收系统的无功功率。水轮发电机组甩负荷时转速上升，为了限制转速上升在一定范围内，要求机组有较大的飞轮力矩。水电站一般远离负荷中心，通过长距离高压输电线路接入电力系统，因此水轮发电机参数要考虑电力系统静态、暂态和动态稳定的要求。

基本结构 水轮发电机由定子、转子、轴承、机架（或轴承座）等主要部件及励磁、冷却、制动、测量和灭火等辅助装置等组成。

(1) 定子。水轮发电机的静止部分，由机座、铁芯、绕组等组成。绕组和铁芯是定子的电磁部分；机座连同机架（见水轮发电机机架）是支持机组的结构部件。

(2) 转子。水轮发电机的转动部分，由磁轭、磁极、大轴、支架等组成。磁轭和磁极是转子的电磁部分，大轴和支架是转子的结构部件。

(3) 轴承。分推力轴承（见水轮发电机推力轴承）和导轴承（见水轮发电机导轴承）两种。推力轴承用来承受水轮发电机组转动部分的全部重量和沿轴向的水推力。对于不同型式的机组，导轴承承受不同的负载。立式水轮发电机导轴承只承受机组转动部分的径向不平衡力和电磁不平衡力；卧式水轮发电机导轴承还承受转动部分的重量。

(4) 机架（或轴承座）。用于安置推力轴承、导轴承及其他部件的支撑部件。承受机组推力负荷以及转子径向机械不平衡力和因定转子气隙不均匀而产生的单边磁拉力。机架主要由中心体和支臂组成。（见水轮发电机机架）

(5) 励磁系统。在电机正常运行时提供所需的励磁电流，以维持发电机一定电压和无功功率。当电力系统发生短路或负荷突然变化时，进行强行励磁或强行减磁，以提高电力系统运行的稳定性和可靠性。当发电机正常停机和内部出现短路时，对发电机进行灭磁。（见水轮发电机励磁）

(6) 冷却方式。分为空气冷却与内冷却两种。内冷却又分为水内冷和蒸发冷却。通常采用空气作为冷却介质对定子、转子绕组以及定子铁芯进行冷却。内冷却适用于特大型容量水轮发电机。（见水轮发电机空气冷却、水轮发电机水内冷、水轮发电机蒸发冷却）

(7) 制动措施。水轮发电机组为了在停机过程中缩短低转速惰行时间，可以采用机械制动或电制动，也可以采用混合制动方式。（见水轮发电机组停机制动）

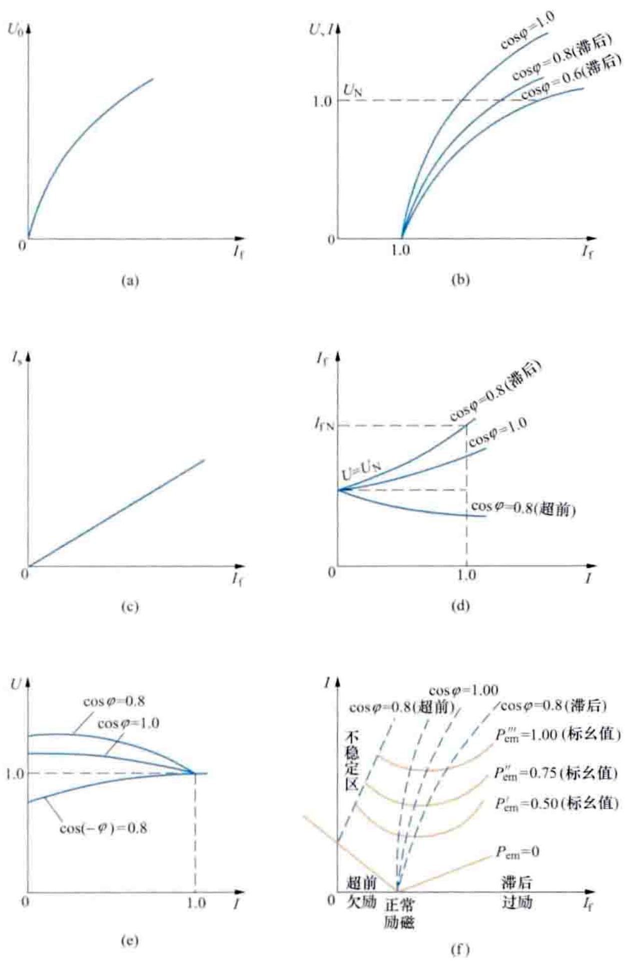
(8) 测量装置。为了监视水轮发电机的安全运行，需配有转速、温度、振动、摆度、压力、液位、流量等测量装置。

(9) 灭火装置。为了迅速扑灭机组内部火灾而设置，采用的灭火介质有水、二氧化碳等。水喷雾灭火是利用装在定子绕组端部附近环管上的喷嘴，在高压水作用下喷出水雾，隔绝空气而灭火，具有结构简单、无重燃危险的优点，但灭火后机组需及时干燥，以防止硅钢片锈蚀和绕组绝缘降低。二氧化碳灭火是利用液态二氧化碳气化时容积增大的特性，排除空气，同时又吸收大量蒸发潜热，将火扑灭。由于二氧化碳气体能使人窒息致死，故应采取必要的通风和排放二氧化碳气体的措施，以确保人身安全。全厂可公用一套装置，通过管路切换到每台机组。这些灭火装置可以是手动或通过温感、烟感元件的自动报警系统起动。为防止误动作，大多采取报警系统的多种元件同时动作报警并经现场确认后才开始灭火。

特性 包括空载特性、负载特性、稳态短路特性、调整特性、外特性及 V 形特性等，通常用曲线表示。这些特性表明在不同条件下，定子端电压（U，空载条件下为 U_0）、定子电流（I，短路条件下为 I_k）及励磁电流（I_f）三者之间的关系：①水轮发电机空载特性表明发电机在额定转速、输出功率为零的条件下，定子端电压与励磁电流的关系曲线，见图（a）；②水轮发电机负载特性表明发电机在额定转速和恒定负载状态下定子端电压与励磁电流的饱和特性，见图（b）；③水轮发电机稳态短路特性表明发电机在额定转速下定子绕组短路电流与励磁电流的关系曲线，见图（c）；④水轮发电机调整特性表明发电机在额定转速和给定的功率因数下，保持定子端电压恒定时，励磁电流与定子电流的关系曲线，见图（d）；⑤水轮发电机外特性表明发电机在励磁电流、转速及功率因数恒定时，定子端电压与定子电流的关系曲线，见图（e）；⑥水轮发电机 V 形特性表明发电机在定子端电压、转速、功率因数恒定时，定子电流与励磁电流关系曲线，见图（f）。

主要参数 包括额定容量、额定电压、额定功率因数、额定转速、短路比、同步电抗、瞬态电抗、超瞬态电抗、负

序电抗、零序电抗、定子绕组短路时间常数、直轴瞬态短路时间常数、直轴超瞬态短路时间常数、调相容量、进相容量、充电容量、飞轮力矩、额定效率和机械时间常数等。



水轮发电机的特性曲线

(a) 空载特性；(b) 负载特性；(c) 稳态短路特性；(d) 调整特性；(e) 外特性；(f) V形特性

发展简史与趋势　1958年以前，世界上投运的水轮发电机单机容量不大于150MV·A。1961年单机容量265MV·A机组在苏联布拉茨克水电站投入运行；1967年588MV·A机组在苏联克拉斯诺雅尔斯克水电站投运；1975年615MV·A机组在美国大古力水电站投入运行，1978了718MV·A机组。1984年824MV·A机组在巴西、巴拉圭共管的伊泰普水电站投入运行。大容量发电机的冷却方式采用空气冷却或半水冷等方式。大容量水轮发电机效率已达98.3%～98.9%。

1949年以前，中国仅能生产小容量的水轮发电机。1941年生产的60kW水轮发电机安装在当时西康省的雅安电厂，之后又生产了单机容量为200kW的水轮发电机。1949年后，中国的水电事业开始了新的发展，水轮发电机单机容量逐渐增大，1953年为7.5MV·A，1955年为12.5MV·A，1959年为85.3MV·A，1966年为257MV·A，1972年为343MV·A（刘家峡），1987年为356MV·A（龙羊峡），1997年为444MV·A（李家峡），1998年为611MV·A（二滩），2003年为778/840MV·A（三峡），2012年为855/889MV·A（向家坝）。向家坝水电站机组为世界上已投运的单机容量最大的水轮发电机。

随着单机容量的增大，新材料、新工艺、新结构已普遍在大、中型水轮发电机上采用。定子铁芯现场组装叠片不仅增加了定子铁芯的刚度，而且对防止铁芯"瓢曲"，降低因铁芯分瓣合缝不严而产生的冷态振动有较好的效果。发电机转子支架采用圆盘式支架、无轴结构，定子机座采用浮动结构等，使大容量发电机具有质量小、刚度大、稳定性好、消除热胀冷缩应力变形等优点。

shuilunfadianji-bianyaqizu jidianbaohu

水轮发电机-变压器组继电保护　(relay protection of hydro-generator and transformer unit)　用以检测水轮发电机-变压器组电气故障或异常运行工况，并发出报警信号或保安操作指令，以终止故障发展的自动化装置。水轮发电机-变压器组的继电保护以纵联差动保护为主保护，并配置其他保护。水电站往往采用发电机-变压器单元或扩大单元接线，某些具有超高压母线的水电站，采用联合单元接线方式，保护配置有所不同。

纵联差动保护　对发电机-变压器组，当发电机与变压器之间有断路器时，发电机与变压器装设各自的纵联差动保护。当发电机与变压器之间没有断路器时，100MW及以下的发电机可只装设发电机、变压器共用的纵联差动保护，100～200MW的发电机还应装设单独的纵联差动保护；200MW及以上的发电机-变压器组，其发电机和变压器设单独的纵联差动保护，均采用双重快速保护。扩大单元的发电机-变压器组，发电机和变压器装设各自的纵联差动保护。采用发电机-变压器联合单元时，各变压器单独装设纵联差动保护，当需装设双套或双重化快速动作保护时，两组变压器可分别装设双套纵联差动保护（其中一套也可与发电机一起组成发电机-变压器组差动保护），也可将其中的一套变为两台变压器共用的差动保护。采用分别装设双套差动保护时，两台变压器的高压侧与断路器之间的连接母线需另有快速保护。

其他保护　主要有过流保护、零序电流电压保护和过励磁保护等。发电机-变压器组的变压器低压侧一般不设外部相间短路保护，而是利用发电机的反应外部短路的后备保护。停机时如果变压器带厂用电，变压器高压侧需装设过流保护作为变压器的后备保护。对于330kV及以上电力变压器，配置过励磁保护。

出于对保护可靠性的要求，大型发电机、电力变压器电气量保护通常按双套保护分别组屏，每屏配置一套完整的主保护及其他保护。变压器非电量保护单独设置一块保护屏，其电源回路和跳闸出口回路独立于电气量保护。发电机变压器之间无断路器时，变压器和发电机的电气量保护可设置在同一保护屏。

shuilun fadianji daozhoucheng

水轮发电机导轴承　(guide bearing of hydro-generator)　主要承受水轮发电机转动部分的径向机械不平衡力和由于转子偏心所引起的单边磁拉力的轴承结构。主要作用是防止轴的摆动。导轴承由导轴承瓦、支柱螺栓、套筒、座圈、滑转子等主要部件组成。导轴承瓦多由分块扇形摆动瓦组成，材料多采用巴氏合金或弹性金属塑料；支柱螺栓和套筒用圆钢或锻钢制成，座圈和滑转子的材质为铸钢，滑转子热套于轴上并与轴一起加工。

根据水轮发电机的总体结构布置，导轴承的结构形式分为：①具有单独油槽的导轴承。它一般都有滑转子，导轴承瓦直径较小，瓦块数也较少，在滑转子下缘开径向供油孔，在离心力作用下向轴瓦供油，并使油路经油冷却器形成循环。这种结构适用于大、中容量悬式水轮发电机或半伞式水轮发电机的上导轴承。②与推力轴承合用一个油槽的导轴承。它常将推力头兼作滑转子，具有结构紧凑的特点，但导轴承直径较大，瓦块数也较多。为了加强导轴承瓦的润滑冷却，通常在镜板或推力头上开若干个径向孔。此种结构适用全伞式水轮发电机的下导轴承和中小容量悬式水轮发电机的上导轴承。

通常导轴承用支柱螺栓调整轴瓦间隙。也可采用楔子板代替支柱螺钉，以简化结构和制造工艺。调节螺母和锁定零件装设在轴承油面上部靠近轴承盖处，便于调节轴承瓦面与滑转子的间隙。

当出现水轮发电机磁路不对称，励磁绕组发生两点接地，轴附近存在漏磁等情况时，轴两端间将出现感应交变电动势。如果轴承油膜被击穿，并形成电流通路，镜板和轴瓦将因流过轴电流而受损。为此需采取轴绝缘措施，通常上导轴承和推力轴承均用绝缘垫与轴承座相绝缘。在不充油的情况下，导轴承对地绝缘电阻值应不低于 5MΩ。

shuilun fadianji dianyun

水轮发电机电晕 (corona of hydro-generator unit)

水轮发电机定子线棒端部表面、线棒与定子槽壁的气隙中，气体介质在不均匀电场中发生局部电离，在电离处出现蓝色荧光的现象。电晕产生热效应和臭氧、氮的氧化物，使线圈内局部温度升高，导致胶黏剂变质、碳化，股线绝缘和云母变白，进而使股线松散、短路，绝缘老化。20 世纪 70 年代初期，中国刘家峡水电站 1 号和 2 号机组、柘溪水电站 4 号机组、盐锅峡水电站 5 号和 6 号机组均发生了由电晕严重而引起的线棒绝缘损坏事故。

水轮发电机线棒的防晕处理措施已经较成熟。在制造厂内，对已成型线棒的不同部位表面使用不同的半导体绝缘材料，同时严格控制加工精度，防止线棒与槽壁间出现较大空隙。现场安装时，采用半导体槽衬纸裹半导体胶包敷在线棒的直线段，既可以消除线棒与槽壁之间的气隙，也可以有效消除电晕的产生。

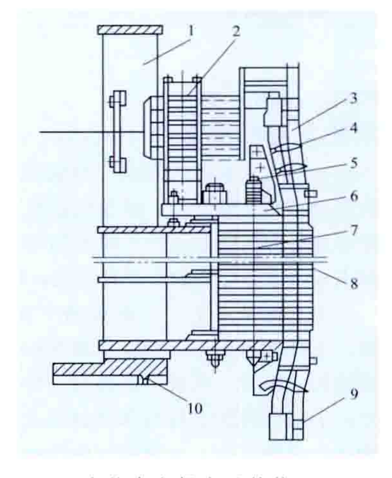
shuilun fadianji dingzi

水轮发电机定子 (stator of hydro-generator)

水轮发电机的静止部件。由机座、铁芯、绕组及基础件等组成。机座是固定铁芯的结构件，铁芯和绕组是定子产生旋转磁场保证磁通及电流通路必备的电磁部分，绕组由许多线棒按一定规律排列而成。线棒通常分两层嵌入定子铁芯的槽内，并以一定的接线方式连接成回路，通过铜环引线汇流后输出电功率。水轮发电机定子结构见右图。

机座 由壁、环、立筋及合缝板等部件组成，主要承受和传递扭矩。机座一般采用钢板焊接结构，小型机座也采用铸钢结构。机座具有一定的刚度，以避免定子的变形和振动，并能承受定子短路时扭矩产生的切向力和转子半数磁极短路时引起的单边磁拉力。对悬式水轮发电机，机座还要承受上机架和机组转动部分（包括水推力）等重量引起的轴向力。对大直径机座，还应考虑防止铁芯热膨胀引起变形的措施。

定子铁芯 主要是构成发电机的磁路，安放线圈。定子铁芯由扇形片、通风槽片、定位筋、齿压板、拉紧螺杆及固定片等零部件装压而成。定位筋通过托块焊于机座环上，扇形片、通风槽片叠装于定位筋的鸽尾上，并通过上、下齿压板及拉紧螺杆将铁芯压紧成整体。铁芯通常用 0.5mm 厚无取向冷轧硅钢片冲制成扇形片，两面涂刷绝缘漆后叠压而成。叠压铁芯时要分成若干段，段间装有通风槽钢，供通风散热用。



水轮发电机定子结构

1—机座；2—铜环引线；3—线圈；4—端箍；5—拉紧螺杆；6—齿压板；7—铁芯；8—测温装置；9—绝缘盒；10—基础板

定子绕组 与主磁通相对运动产生电动势，进行机、电能量变换的导电部件，是发电机组与外部电力系统的连接部件，用于送出或吸收有功功率。定子绕组由线棒、绝缘和汇流排组成，主要有叠绕组和波绕组两种型式。

叠绕组 用扁铜线绕成的环形线圈。这种线圈的每一个线圈边内可以包含若干匝，而每一匝又可由多股绝缘铜线组成。叠绕组的匝数和槽数比较容易调整，端部接线焊接工作量小。适用于中小容量和部分大容量水轮发电机。

波绕组 绕组的形状呈波浪形伸展。为了减少附加损耗，线圈在槽内直线部位进行编织换位。适用于高电压、大容量水轮发电机。

基础件 定子的基础件由基础板、楔形板、螺栓、销钉及基础螺杆等组成。（见水轮发电机基础）

shuilun fadianji feilun liju

水轮发电机飞轮力矩 (flywheel effect of hydro-generator)

发电机转动部分的重量 G 与其惯性直径 D 平方的乘积，用 GD^2 表示。飞轮力矩表明电力系统出现大干扰时，水轮发电机组转动部分保持原来运动状态的能力，对电力系统的暂态过程和动态稳定性有很大影响。

飞轮力矩直接影响机组甩负荷时的速度上升率和系统负荷突变时机组运行的稳定性，对水轮机的调节保证计算也有较大影响，飞轮力矩大，机组甩负荷后的转速上升率如保持一定值，则可允许蜗壳进口和压力管道内的压力上升率有适当的提高。但增大飞轮力矩将增加发电机重量和造价，也延长了机组的起动时间。通常，水轮发电机组的飞轮力矩需要满足水道发电系统调节保证计算结果的要求。

当立式水轮发电机基本尺寸确定后，飞轮力矩 GD^2 值可按下列经验公式计算

$$GD^2 = kD_i^{3.5} l_t$$

式中 k 为经验系数，一般可按表选取；D_i 为定子铁芯内径，m；l_t 为定子铁芯长度，m。

经验系数 k 取值

机组转速（r/min）	＜100	100～375	＞375
经验系数 k	54～49	53～48	52～47

shuilun fadianji jijia

水轮发电机机架 （bracket of hydro-generator）

立式水轮发电机推力轴承、导轴承、制动器以及转桨式水轮机受油器的支撑部件，承受机组推力负荷，以及转子径向机械不平衡力和因定转子气隙不均匀而产生的单边磁拉力。机架主要由中心体和数个支臂组成，结构采用钢板焊接。

中心体是由上、下圆板和立板组装成的圆盘形焊接结构，支臂是由上、下翼板和腹板组成工字形或盒形截面的焊接结构。通常，机架中心体与支臂焊为一体。超出运输条件时，采用可拆卸支臂或部分拆卸支臂的机架，中心体与支臂通过合缝板组合。大型机组中普遍采用厂内预组装、在工地现场将支臂与中心体焊成一体的整体结构。

水轮发电机机架按照布置位置分为上机架和下机架。根据承载的性质，机架可分为承重（负荷）机架和非承重机架两类。放置推力轴承的机架统称为承重机架，它承受机组转动部分的全部重量、水轮机的轴向水推力、机架和轴承自身的重量以及作用在机架上的其他负荷。悬式水轮发电机组的上机架或伞式水轮发电机的下机架即属于承重机架。这类机架除承受轴向负荷外，还承受径向负荷。非承重机架主要承受通过导轴承传递的径向力，非承重的下机架还承受制动器顶起转子时的轴向力和制动时的制动力矩。

按机架支臂的结构形式可分为辐射型、斜支臂型（支臂与中心体斜交）、多边（八卦）框架型、井字型和桥型，后两种现已很少采用。

为了适应大容量水轮发电机定子铁芯热膨胀引起的变形，在上机架设计上采用了适应定子径向变形的结构，如采用斜支臂机架、在支臂与机座连接处装有斜翼板或径向销钉连接固定结构。为改善基础受力状态，在机架设计上将径向力尽量转换为切向力传递到基础上，以满足电站土建结构设计使机坑尽量小的承受径向力的要求。

悬式水轮发电机上机架如图1所示。

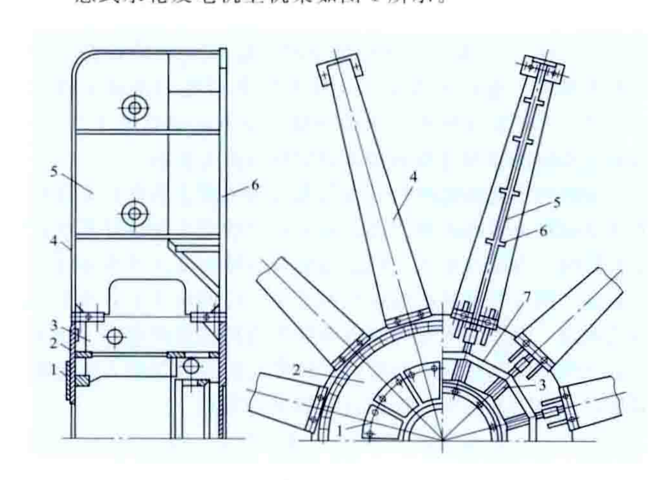


图1　悬式水轮发电机上机架

1—加强圈；2—上圆板；3—立筋；4—上翼板；5—腹板；6—下翼板；7—横梁

伞式水轮发电机下机架如图2所示。

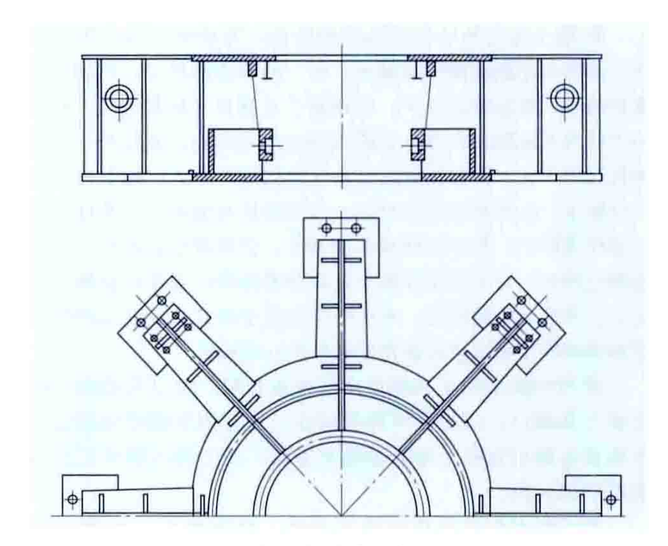


图2　伞式水轮发电机下机架

shuilun fadianji jichu

水轮发电机基础 （foundation of hydro-generator）

承受水轮发电机重量及扭矩的钢筋混凝土结构。立式水轮发电机静止部分的垂直荷重和扭矩主要通过定子基础板和固定螺杆传至混凝土基础。转动部分的重量和水推力，对悬式水轮发电机也是通过定子基础板和固定螺杆传至基础；对伞式水轮发电机，则通过下机架传至基础。此外，为了减小水轮发电机的径向振动，常在上机架（或下机架）支臂外端装设承受径向力的千斤顶，千斤顶的另一端接触在发电机机坑壁混凝土上。定子基础件包括基础板、楔形板、螺栓、销钉及基础螺杆等。基础板一般采用钢板焊接结构，上、下端面经加工而成，也可采用铸造结构。楔形板由上、下两块组成，斜度为1∶50，用以调整定子水平面和高程。楔形板由厚钢板加工而成，两块楔形板对称放置在基础板下部，楔形板下面与混凝土基础之间铺以垫板，以使基础压应力均匀分布在混凝土基础面上，然后用埋设在混凝土基础面内的基础螺杆压紧。为了传递扭矩和安装准确，定子机座与基础板之间用销钉定位。

作用于机墩的载荷有：①垂直恒载荷 P_c，包括机墩自重、风洞钢筋混凝土自重、发电机层楼板载荷及水轮发电机本体静止部分的重量。②垂直集中动荷 P_d，包括机组转动部分的重量。③扭矩，包括正常运行时电磁感应产生的扭矩 M_t 和短路时产生的短路扭矩 M'_t。④水平集中动载荷，包括水平离心力和切向水平力。水平离心力是由于转动部分偏心矩所引起，正常运行时为 P_m，飞逸时为 P_{mp}。切向水平力是由正常扭矩或短路扭矩通过定子基础螺杆产生的，正常时为 P_n，短路时为 P'_n。⑤地震产生的附加力 P_e。⑥机座的温度应力 P_t。上述载荷除机墩自重、风洞钢筋混凝土自重和发电机层楼板载荷由厂房结构计算确定外，其余载荷值均由发电机制造厂提供。载荷组合条件为：正常运行时，计算载荷$=P_c+P_d+M_t+P_m+P_n+P_e+P_t$；短路时，计算载荷$=P_c+P_d+M_t+M'_t+P_m+P'_n+P_t$；飞逸时，计算载荷$=P_c+P_d+P_{mp}+P_t$。

shuilun fadianji jidianbaohu

水轮发电机继电保护 （relay protection of hydro-generator）

检测发电机电气部分不正常运行工况或故

障，发出报警信号，有选择地向断路器发出跳闸或停机等操作指令以终止故障发展的自动化装置。针对故障和不正常运行的类型，水轮发电机装设有差动保护、过电流保护、定子绕组接地保护、转子回路一点接地保护、失磁保护、失步保护、过电压保护、过负荷保护等。

差动保护　发电机两端电流互感器电流的矢量差达到设定动作值时起动的主保护。除容量在 1MW 及以下的发电机采用电流速断、低电压或过电流作为发电机及其引出线的相间短路保护外，其他发电机均需装设差动保护来保护发电机内部及其引出线的相间短路故障。

发电机差动保护有纵差保护、裂相横差保护及零序电流横差保护。发电机纵差保护分为完全纵差保护和不完全纵差保护，裂相横差保护分为完全裂相横差保护和不完全裂相横差保护。除横差保护外，水轮发电机所配置的差动保护一般采用穿越制动特性的保护原理。主要有改进型标积制动式差动保护、三段折线比率差动保护及基于采样值原理的综合差动保护。

纵差保护、裂相横差保护及零序电流横差保护对内部短路类型的灵敏度各不相同，应用“优势互补、综合利用”的原则制定出发电机引出线及其内部短路故障保护的配置方案。

过电流保护　作为发电机外部相间短路故障和发电机主保护的后备，根据短路故障时电流增大、电压下降或出现负序分量等特征，可构成各种类型的过电流保护：①仅反应故障电流的过电流保护；②低电压起动的过电流保护，电压降低和电流增大同时出现时保护动作；③反应负序电压增大、相间电压降低和电流增大的带复合电压起动的过电流保护，负序电压元件能增加不对称短路故障时的灵敏性；④负序过电流加单元件低电压起动的过电流保护，可以同时反应不对称和对称短路故障时对灵敏性的要求；⑤对于采用自并励方式的发电机，为防止短路电流衰减导致后备保护拒动，采用低电压起动电流自保持的过电流保护。

定子绕组接地保护　容量为 100MW 及以上的发电机装设保护区为 100％的定子绕组接地保护，容量为 100MW 以下的发电机则装设保护区不小于 90％的定子绕组接地保护。

发电机中性点接地方式一般为：①当接地电容电流小于允许值时（见表），采用不接地或电压互感器接地方式；②当接地电容电流大于允许值时，采用欠补偿的消弧线圈或接地变压器接地方式，将接地电流降至安全值以下。

发电机定子绕组单相接地故障电流允许值

发电机额定电压（kV）	故障电流允许值（A）
6.3	4
10.5	3
13.8～15.75	2
18～20	1

保护区不小于 90％的保护装置由连接发电机出口电压互感器开口三角侧或中性点电压互感器、消弧线圈二次侧的滤过式零序电压保护组成。100％保护区的定子绕组接地保护，中国一般采用反应近机端单相接地的上述滤过式基波零序过电压保护和反应近中性点侧单相接地的比较机端及中性点三次谐波电压原理的接地保护部分组成。基波零序电压接地保护与三次谐波电压原理接地保护出口宜分开，前者跳闸，后者带时限动作于信号。

当发电机中性点采用接地变压器接地时，两套定子绕组接地保护中一套采用基波零序电压加三次谐波电压原理保护，另一套采用外加注入低频电源型定子接地保护。采用保护装置动作于跳闸的方式。

转子一点接地保护　保护可采用：①叠加直流电压的一点接地保护；②叠加交流电压的一点接地保护；③切换采样式（乒乓式）一点接地保护。保护带时限动作于信号，或动作于程序跳闸。

失磁保护　水轮发电机失去励磁后，一方面将从系统吸收大量的无功功率，引起电力系统的电压下降；另一方面发电机将过渡到异步运行，此时反应功率较大，而反应功率是以 2 倍转差变化的，因而发电机的有功功率将随反应功率而产生较大摆动，影响系统稳定运行，还可能导致发电机定子和转子过热。失磁保护主要由按静稳边界或按异步边界整定的阻抗元件、判别系统电压降低的低电压元件、判别转子电压异常降低的元件，以及防止误动作的闭锁元件和延时元件等构成。

失步保护　大容量发电机失步时对系统影响较大，而且长时间的振荡电流将使定子绕组过热及端部遭受机械损伤，容量为 300MW 及以上的发电机一般装设失步保护。处于电动机工况的抽水蓄能机组由于失步期间机端电压大幅度波动，其输入功率亦将随之急剧变化，扰乱了泵组的正常运行，需要装设失步保护，将机组及时切除。失步保护可由双阻抗元件或三阻抗元件构成。

过电压保护　水轮发电机装设过电压保护，以防危及发电机绝缘。该保护由过电压继电器和时间继电器构成，延时动作于灭磁和切除断路器。

过负荷保护　水轮发电机装设定时限过负荷保护，50MW 及以上的水轮发电机装设定时限负序过负荷保护作为发电机转子表层过负荷保护，100MW 及以上的水轮发电机还装设定时限转子绕组过负荷保护。

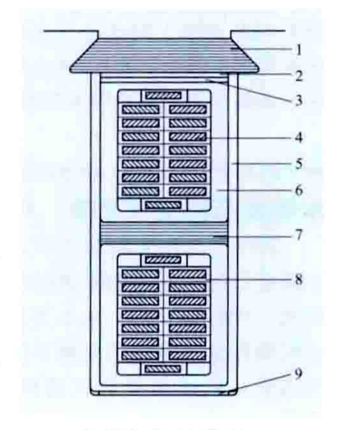
shuilun fadianji jueyuan

水轮发电机绝缘　(insulation of hydro-generator)

水轮发电机带电导体隔离开的不导电固体材料的体系。包括定子绕组绝缘和转子绕组绝缘。在长期运行过程中，绕组绝缘受到电、热、机械力的作用和环境条件的影响会逐渐老化，因此绕组绝缘要具有产品所要求的耐热等级、足够的电气强度、优良的机械性能和良好的工艺。

定子绕组绝缘　承受高电压，对其介电性能和防晕性能要求高。绝缘包括股间、层间、排间、匝间和对地绝缘与防晕层，端部的各种支撑或固定用的绝缘构件以及连接线和引出绝缘。定子绕组主绝缘采用环氧粉云母材料，其工艺主要有少胶真空压力浸渍（VPI）、多胶模压和多胶真空压缩（VPR）系统，也是大中小型水轮发电机组常用的几种线棒绝缘成型方法。少胶真空浸渍系统用少胶云母带包绕线棒，再进行真空压力浸渍无溶剂树脂使线棒绝缘固化成型。多胶模压系统用多胶环氧粉云母带包绕线棒，放入热压模中使线棒绝缘固化成型。多胶真空压缩系统用多胶环氧粉云母带包绕线棒，放入真空压缩罐通过液压介质加压固化成型。

定子线棒剖面如图所示。



定子线棒剖面图

1—槽楔；2—波纹板；3—绝缘垫条；4—股线；5—槽衬；6—主绝缘；7—层间垫条；8—股线绝缘；9—槽底垫条

转子绕组绝缘　承受各种机械应力和大电流，对其机械性能和耐热性能要求高。绝缘主要由匝间和极身绝缘组成。匝间用诺美（Nomex）纸绝缘，通过环氧胶黏结，与转子绕组热压成一体。极身绝缘采用 Nomex 纸缠绕，或采用聚酯玻璃纤维材料。转子绕组与极身绝缘间隙用浸渍涤纶毡和高强度环氧层压板塞紧固定。

耐热等级　水轮发电机常用绝缘等级分 B、F、H 级，相应的允许温度见表。由于运行中机组绕组实测温度不完全反映最热点温度，且绕组绝缘的寿命随温度的升高而呈指数下降，故设计时通常留有 5～10℃ 的裕度，以保证绝缘寿命。

绕组绝缘等级及其允许温度

绝缘等级	B	F	H
允许温度（℃）	120	140	165

电气强度　机组运行中除受到正常工作电压长期作用外，有时还受到大气过电压和内部过电压的瞬时作用，因此定子线圈绕组绝缘的击穿电压应比额定电压高 5～6 倍以上。为了检查绝缘结构的缺陷，在制造和安装过程中要进行多次工频耐压试验。

机械性能　机组在自同步合闸或突然短路时，都会产生强大的冲击短路电流，使定子绕组槽部和端部以及转子绕组受到强大的电动力作用，因此绕组要具有一定的机械强度，能够承受一定的机械应力。机组起停频繁和负荷剧烈变化，使导体和绝缘产生热应力，也会使绝缘变形及损伤，因此还要求绝缘具有一定的弹性和强度。

热老化　水轮发电机运行要求线圈的绝缘在工作温度的长期作用下不易老化，不降低绝缘性能。

介质损失　在工作温度和电压的作用下，线圈绝缘的介质损失要小，以防止由介质损失产生的附加热量，加速绝缘的老化，以致损坏绝缘。

耐电晕　在高电场作用下，在绝缘表面电场分布不均匀的部位（如端部出槽口及通风槽口），气体易发生局部电离而产生臭氧，在臭氧、水气及氮的氧化物的联合作用下使绝缘受到腐蚀，从而降低绝缘的介电及机械性能。因此，高电压定子绕组的绝缘应具有较高的耐电晕能力。通常额定电压为 6.3kV 及以上的水轮发电机，定子单个线棒在 1.5 倍额定电压下不起晕；整机耐电压时，在 1.05 倍额定电压下，定子端部应无明显晕带和连续的金黄色亮点。

shuilun fadianji kongqi lengque

水轮发电机空气冷却　（air cooling of hydro-generator）

利用空气作为冷却介质，对水轮发电机定子绕组、转子绕组及定子铁芯表面进行冷却，是水轮发电机最广泛采用的一种冷却方式。从小型到大型机组均有采用。根据发电机的容量和损耗以及转子产生的压头，水轮发电机的通风系统可以采用开启式通风、管道式通风和密闭循环式通风。

开启式通风　利用发电机周围环境空气自流冷却，具有结构简单、安装方便的优点。由于受环境的影响大，故防潮、防尘能力差，散热量也有限，适用于额定容量为 1000kV·A 及以下的水轮发电机。

管道式通风　冷空气一般取自温度较低的水轮机室，靠发电机自身的风压作用将热空气经风道排至厂外，借助风道高差的拔风作用，散热能力在相同条件下比开启式通风略有提高，适用于 1000～4000kV·A 的水轮发电机。为防止尘土进入发电机内，可在进风口设置滤尘器。

密闭循环式通风　发电机四周密闭形成内部冷却介质（空气）不与外界进行介质交换的一种循环的通路，通过空气冷却器将热量传递给二次冷却介质（水）进行热交换的冷却方式。该方式具有冷却空气干燥、清洁、冷风稳定、散热量大等优点，适用于 4000kV·A 及以上的立式水轮发电机。按空气循环分类，有自循环和强迫循环通风方式。按风路流动路径分类，有双路径向、双路轴向、单路径向、单路轴向等几类通风方式。大中型水轮发电机常用密闭自循环双路径向通风系统，从空气冷却器出来的冷却空气分上、下两路，上路经上机架支臂之间的空间，下路经基础混凝土预留风道进入转子支架，在转子支臂离心风压及磁轭两端的风扇压头作用下，大部分通过磁轭风沟、磁极极间空间和定子与转子间空气隙，流经定子通风沟，少部分流经定子端部绕组和齿压板间隙，然后汇集定子机座的冷却器窗孔进入空气冷却器，完成自循环过程。空气冷却器由多排并联的冷却水管和上、下水箱等主要零部件组成。大、中型容量水轮发电机一般装设数个冷却器，各个冷却器通过阀门以并联连接至环形进、出水管上。这样，当任一个冷却器发生故障或检修退出运行时，可单独关闭，而不影响其他冷却器的正常运行。

低速水轮发电机均采用双路径向无风扇系统。这种通风系统的特点是发电机直径大，而铁芯短，转子扇风作用产生的气流已足以使定子绕组端部得到充分冷却，因而在转子两端不再装设风扇。在此基础上，又发展了端部回风无风扇径向通风系统，即将冷却器出来的冷风直接冷却定子端部后再进入转子进行循环。中国二滩、小湾、龙滩、三峡和向家坝等大型机组的水电站均采用这种结构。灯泡式水轮发电机由于机组结构紧凑、转子直径小、空气流动阻力较大，装设轴流式风机强迫通风，以加强发电机的冷却。对于容量大于 15MW 的灯泡式水轮发电机，通常采用径向、轴向混合通风方式。

shuilun fadianji lici

水轮发电机励磁　（excitation of hydro-generator）

给水轮发电机转子绕组提供电流以建立磁场的设施。通常采用直流电流建立磁场。励磁的主要作用是：①维持单机正常运行状态下发电机的电压；②在多台机组并列正常运行状态下，稳定地分配发电机间的无功功率；③发电机在正常运行状态下，电力系统因负荷变化出现扰动时，维持电力系统稳定运行；④电力系统发生故障导致发电机电压严重下降时，提供强行励磁，以提高电力系统的运行暂态稳定性。励磁系统由励磁功率单元、励磁调节器和灭磁单元三个基本环节构成。

励磁功率单元　给发电机提供励磁电流。按照提供励磁功率电源的不同，可分为直流电机励磁系统和整流器励磁系统两大类。

直流电机励磁系统　由与发电机同轴的直流发电机向转

子绕组直接供给励磁电流。根据供给和调节直流励磁机励磁电流方式的不同，可分为连续调节型和开关调节型两种。

（1）连续调节型直流电机励磁系统。发电机励磁电流的调节通过连续调节直流励磁机的励磁电流改变励磁机的输出电压，从而改变发电机转子绕组电流而实现。图1（a）所示为自并励接线，励磁机的励磁电流由本身的自励回路和自动励磁调节器（automatic voltage regulator，AVR）共同供给，改变励磁机的输出即可改变发电机的励磁电流。图1（b）所示为他励接线，同轴交流副励磁机经晶闸管整流器，AVR控制其输出电流来改变直流励磁机的输出电压，从而改变发电机的励磁电流。

（2）开关调节型直流电机励磁系统。如图1（c）所示，在励磁机励磁回路中，串接工作于直流开关状态的晶闸管整流器，通过AVR调节该直流开关导通时间的长短（脉冲宽度）或导通次数的多少（脉冲频率）来控制励磁电流。

整流器励磁系统　由交流电源经整流器变换成直流后提供励磁电流。根据供给整流器交流电源的不同，主要有他励晶闸管整流器励磁系统、自复励整流器励磁系统、自并励晶闸管整流器励磁系统等。简单可靠的自并励晶闸管整流器励磁系统已广泛用于各种容量的水轮发电机。

（1）他励晶闸管整流器励磁系统。如图1（d）所示，发电机的励磁电流由同轴交流励磁机9（亦称辅助发电机）经晶闸管整流器6变换成直流后供给，励磁电源与发电机的运行方式无关。

（2）自复励整流器励磁系统。励磁功率取自两部分，一是取自与发电机电压有关的自励部分，一是取自与定子电流有关的复励部分。此系统同时具有自励和复励功能。依照接线方式的不同，分为直流侧并联、直流侧串联、交流侧并联、交流侧串联4种自复励励磁系统，分别如图1（e）～图1（h）所示。

（3）自并励晶闸管整流器励磁系统。如图1（i）所示，发电机的励磁电流由接于机端的励磁变压器10经晶闸管整流器6供给，并由AVR进行调节，其励磁功率取自发电机机端。

励磁调节器　自动调节由功率单元供给的励磁电流。励磁调节器按其构成方式可分为模拟式调节器和数字式调节器。

模拟式励磁调节器　如图2（a）所示，测量比较环节用来测量发电机端电压与给定基准电压之间的偏差值。综合放大环节对输入电压偏差信号以及各类励磁控制信号进行比例相加并给予放大，使之成为既反映输入信号的大小又满足移相触发要求的控制电压。移相触发环节根据输入控制信号变化，相应地改变晶闸管触发脉冲的相位，以控制励磁电压，从而控制励磁电流。

数字式励磁调节器　又称微机励磁调节器。当采用微机（微型计算机或微处理器）时，其主要环节构成框图如图2（b）所示，测量硬件用以采集和输入信号。由微机进行综合、运算，将控制量转换成触发脉冲，经放大后，控制励磁功率单元。

灭磁　将储存在转子绕组中的能量尽快地予以消除。灭磁方法主要有3种：①放电电阻灭磁。这种方式利用磁场断路器断开时产生的弧压，迫使能量转移到灭磁电阻中消耗完，所以也称移能灭磁，为主流灭磁方式。灭磁电阻有线性电阻和非线性电阻两种。非线性电阻由氧化锌或碳化硅制成的非线性电阻阀片组成，其电阻值随流过电流值的增大而减小，可以降低转子过电压的倍数，得到较快的灭磁速度。灭磁磁场断路器一般设在转子回路上，也有的设在整流桥输入端的交流回路侧，后一种方式为交流灭磁。②具有灭弧栅片的灭磁磁场断路器灭磁。灭磁时将灭磁磁场断路器并联或串联接至转子绕组，将磁场能量消耗在形成短弧的灭弧栅片上，这种方式现在极少采用。③利用晶闸管全控桥整流电路逆变灭磁，灭磁过程的实质是将整流器由整流工作状态转换成逆变工作状态，将转子磁场能量回馈到交流侧，这

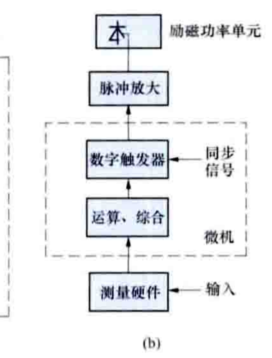


图2　励磁调节器主要环节构成框图

（a）模拟式调节器；（b）数字式调节器

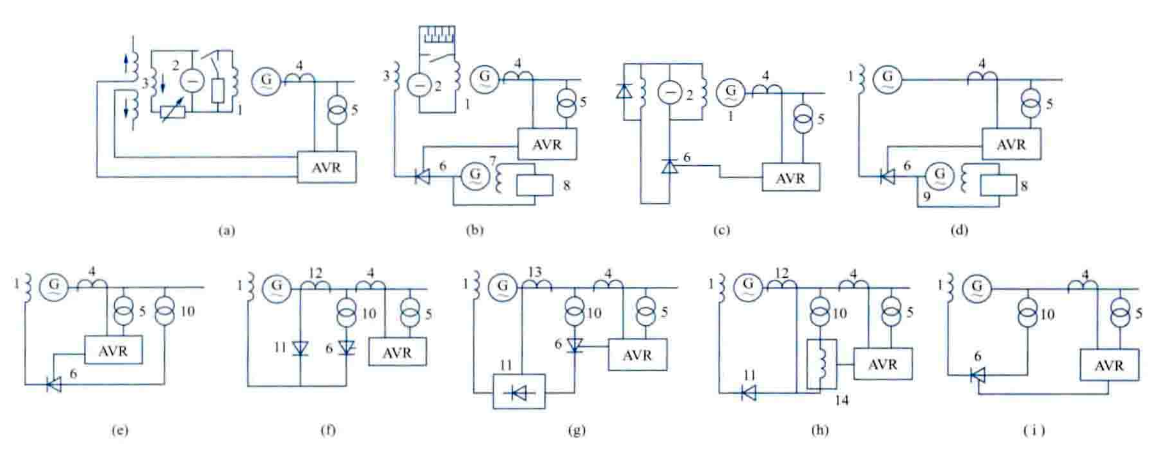


图1　励磁系统原理接线

（a）自并励接线；（b）他励接线；（c）开关调节型直流电机励磁系统；（d）他励晶闸管整流器励磁系统；

（e）～（h）自复励整流器励磁系统；（i）自并励晶闸管整流器励磁系统

1—转子绕组（励磁绕组）；2—直流励磁机；3—直流励磁机励磁绕组；4—电流互感器；5—电压互感器；6—晶闸管整流器；7—交流副励磁机；8—自励恒压装置；9—交流励磁机；10—励磁变压器；11—二极管整流器；12—功率变流器；13—电流电压变换器；14—电抗器；AVR—自动励磁调节器

种方式用于正常停机和机械事故停机的灭磁。

shuilun fadianji shuineileng

水轮发电机水内冷 （water cooling of hydro-generator） 将水通入水轮发电机导体内部的直接冷却方式。随着水轮发电机单机容量的不断增大，采用空气冷却难以满足发电机散热要求，由于水的热容量和热导率远比空气大，因此采用散热能力强的水内冷方式，可大大提高发电机冷却效果。水内冷主要分全水内冷、双水内冷和半水内冷3种形式。定子绕组、转子绕组和定子铁芯均采用水内冷，称为全水内冷；定子绕组、转子绕组采用水内冷，定子铁芯采用空气冷却，称为双水内冷；定子绕组采用水内冷，转子绕组及定子铁芯采用空气冷却，称为半水内冷。

水轮发电机水内冷与水轮发电机空气冷却相比，可以提高发电机的极限容量达1.5倍左右，绕组运行温度低，冷却较均匀，可延长绝缘寿命，机组重量可以减轻10%～20%，硅钢片节省约30%，有色金属材料节省40%、绝缘材料节省约50%。由于水内冷减小了水轮发电机的尺寸和重量，相应也减少了主厂房起吊设备的容量和起吊高度。水内冷发电机的效率和电气参数已达到与空气冷却发电机相同的水平。水内冷发电机存在结构及运行维护复杂，需要配置水处理设备、管道及附件等不足，漏水时容易引起短路事故。由于水在绕组线棒内流动对铜产生电解腐蚀、电化学腐蚀、氧化腐蚀等，因此要求水质纯净、无杂质，水的电导率小于0.4μS/cm（水温为25℃时）、pH值为6.5～9.0、硬度小于2μmol/L。

中国是世界上最早开展水内冷发电机研究的国家之一，早在1958年就开始研究试制了125MW全水内冷汽轮发电机，随后又研制了新安江水电站85MV·A和刘家峡水电站343MV·A的双水内冷水轮发电机，并分别于1966年和1973年投入运行。国际上水轮发电机技术发展很快，加拿大、美国、苏联、奥地利、德国等国家制造了多台水内冷发电机，其中包括发电电动机。巴西伊泰普水电站的半水冷发电机容量为824MV·A，中国三峡水电站的半水内冷发电机额定容量为778MV·A、最大容量为840MV·A。塔吉克斯罗贡斯克水电站的全水内冷发电机容量为667MV·A（166.7r/min），是世界上全水内冷容量最大的水轮发电机。

shuilun fadianji tuili zhoucheng

水轮发电机推力轴承 （thrust bearing of hydro-generator） 应用液体动压润滑承载原理承载水轮发电机组转动部分全部轴向重量及水推力的机械结构部件，是水轮发电机中的关键部件。推力轴承由主要结构部件、支撑结构和轴承座以及油冷却器等组成。推力轴承的润滑性能和结构要满足轴瓦受力均匀、轴瓦温度分布均匀、油路畅通、冷却效果好、维持轴承正常运行的油膜厚度以及良好的油密封等要求。随着单机容量的提高，推力负荷不断增大，推力轴承的承载能力已从7t发展到6000t级的水平。

推力轴承的主要结构部件 由推力头、镜板、推力瓦等组成。

推力头 常用铸钢材料。推力头具有足够的刚度和强度，以承受轴向推力产生的弯矩作用，不致产生有害变形和损坏。推力头一般用热套固定在轴上，随轴而旋转。大、中型水轮发电机，特别是伞（半伞）式发电机，经常将推力头与轴或转子轮毂铸成一体，这样不仅可保证推力头与大轴之间的垂直度，而且还可消除推力头与大轴之间的配合间隙。

镜板 推力轴承的关键部件之一，要求有足够的刚度，通常采用45～55号锻钢。镜板运行时油膜厚度只有0.03～0.07mm，因此要求镜板有较高的精度和光洁度。镜板上、下面的平行度对安装机组时摆度的调整和运行稳定性有直接影响。通常镜板采用整体结构，只有在运输条件受限制时才考虑分瓣结构。

推力瓦 推力轴承的静止部分，通常做成扇形。推力瓦瓦面材料分巴氏合金瓦和弹性金属塑料瓦两种。

巴氏合金瓦是在轴瓦钢坯上浇有一层乌金作为摩擦表面。一般中小型水轮发电机推力轴承轴瓦采用单层结构瓦。大中型水轮发电机推力轴承轴瓦采用双层瓦结构，一层薄瓦约50mm厚，另一层为刚度较大的托瓦组成双层瓦。由于轴瓦较薄，沿厚度方向的温度变化较小，因而热变形小。托瓦刚度大，可以减少轴瓦的机械变形，双层瓦适合轴瓦尺寸较大和润滑参数高的推力轴承。

弹性金属塑料瓦是将弹性复合层与推力瓦的金属瓦坯焊牢在一起，弹性复合层是由弹性绕簧金属丝与四氟乙烯塑料材料整体压制而成。其特点是瓦面无须研刮、瓦温低且较均匀、热变形小、损耗低，各瓦温差仅为2℃左右，同一块瓦各点相差3℃左右。采用弹性金属塑料瓦后，大型机组在起动、停机时不需要附加装置，如轴瓦高压油顶起装置。弹性金属塑料瓦已在大、中、小型水轮发电机推力轴承上广泛采用。

支撑结构和轴承座 支撑结构分刚性支柱球面点、弹性油箱、平衡块支柱、双托盘弹性梁和弹簧束支撑等型式。轴承座是推力轴承的固定部分，由钢板焊接而成，作为安装支承结构用。

刚性支柱球面点支撑 推力轴承支撑中最简单的单支点刚性支撑螺栓的结构，一般用于单位压力在3.0MPa以下负荷的推力轴承。其支撑结构简单、紧凑，加工方便，运行可靠性高，适用于中、小型水轮发电机组。

弹性油箱支撑 无支柱螺栓的弹性油箱支撑结构，各油箱用油管相连并充初始油压。弹性油箱支撑广泛用于推力负荷在1000t级以上的大型推力轴承，也属于单支点支撑。该种支撑结构的主要特点是利用油箱的轴向变形及油压传递使各瓦受力均匀，每块瓦间的受力差可以做到小于3%，瓦间的温度差也小于刚性支撑。弹性油箱支撑已在俄罗斯和中国许多大、中型水轮发电机组上应用。

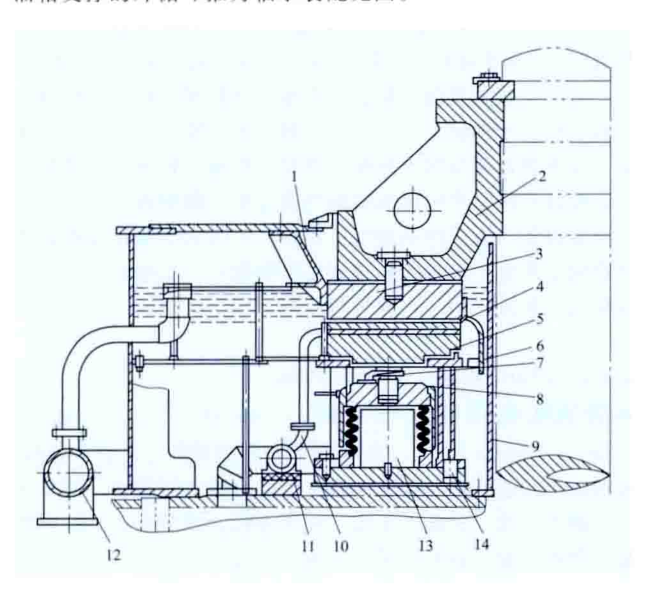
平衡块支柱支撑 由互相搭接的铰支梁支撑，应用杠杆原理传递不均匀力。平衡块支柱支撑也属于单支点支撑，其结构特点是能自动调整瓦间负荷，不同于弹性油箱的液压调整，它是靠机械结构的自调整，已用于推力负荷为37 240kN的葛洲坝二江机组的推力轴承上。

双托盘弹性梁支撑 双托盘弹性梁支撑结构的特点是在托瓦径向由2个内、外托盘支撑，2个托盘下各自有1个球面头圆柱支撑。这两个圆柱安放在以圆柱为支点的弹性平衡梁下，轴瓦能在周向和径向自由摆动，同时托瓦由于有2个

支承圆环支撑，因此长条形推力瓦的径向机械变形得到控制。该支撑结构已用于大型推力轴承上。

弹簧束支撑　弹簧束支撑结构是在轴承座上每块瓦底部布置有一定数量的螺旋压缩弹簧（或碟形弹簧），轴瓦的偏心由弹簧偏向出油边侧布置（进油边，内外缘一定区域不布置弹簧）来实现，具有支撑结构简单、轴承高度低、承载能力大、轴承受力均匀、瓦变形小等特点。该支撑结构已在大型机组的推力轴承上采用。中国三峡水电站机组推力负荷4600t的支撑就采用的是这种结构。

油冷却器　用于冷却推力轴承和导轴承油槽内的热油。整个推力轴承装置在一个盛有透平油的密封油槽内，透平油同时起润滑和冷却的作用。透平油吸收了推力轴承摩擦所产生的热量，再借通水冷却的冷却器与油内的热量进行交换，并把热量带走。通常推力轴承依靠轴承的旋转和冷热油的对流形成循环油路，称为内循环方式。内循环油冷却器分为立式、卧式和抽屉式。在大型或高速推力轴承中，借助外部的独立油泵或依靠轴承自身的镜板内打孔旋转产生压头，进行轴承油循环，称为外加泵外循环，或镜板泵外循环方式。外循环的油冷却器装设在油槽的外部，分为管式和板式。弹性油箱支撑的外循环推力轴承装配见图。



弹性油箱支撑的外循环推力轴承装配

1—隔油罩；2—推力头；3—镜板；4—推力瓦；5—托瓦；6—叶轮泵；7—支柱螺钉；8—锁定板；9—挡油板；10—喷管；11—进油环管；12—出油环管；13—支铁；14—保护套

电磁轴承　利用电磁铁与铁磁材料之间的可控电磁引力实现对转子的无接触支撑的部件。与通用轴承相比，其突出特点是转子间无机械接触、无磨损、微摩擦，功耗为普通轴承的1/100～1/10。在国外，电磁轴承已用在总推力负荷为1230t的300MW抽水蓄能机组中，主要是与传统推力轴承组合，降低推力负荷的静荷载，进而减小推力轴承的摩擦损耗。

shuilun fadianji xiaolü shiyan

水轮发电机效率试验

（efficiency test of hydrogenerator unit）　测量水轮发电机效率，以及将水轮机输入的机械能转换为电能过程中的损耗，并计算转换效率的试验。目的是检验效率计算方法和结果的准确性，检验长期运行后效率的变化，为检修和更新设备提供依据。

水轮发电机效率 η_g 的计算公式为

$$\eta_g=\frac{P_g}{P_g+\Sigma\Delta P}$$

式中 P_g 为水轮发电机母线输出功率，MW；$\Sigma\Delta P$ 为水轮发电机各项损耗，MW。

损耗的测定方法有量热法和直接测量法两种。

量热法　水轮发电机的各种损耗最终都变成热并传给冷却介质（风、水、油），测量冷却介质的流量和温升，可按下式算出各项损耗 ΔP，即

$$\Delta P=c_p\rho Q\Delta t$$

式中 c_p、ρ、Q、Δt 为冷却介质的比热容、密度、流量和温升。

水轮发电机的总损耗用下式表示

$$\Sigma\Delta P=P_i+P_e$$

$$P_i=P_1+P_2$$

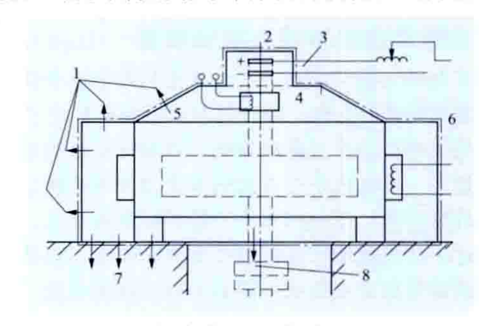
$$P_1=c_p\rho Q\Delta t$$

$$P_2=hA\Delta t$$

$$P_e=P'_e+P'_m$$

$$P'_m=P_m\frac{G_F}{G_F+G_S}$$

式中 P_i、P_e为基准表面内、外的损耗（见图）；P_1为冷却介质带走的损耗；P_2为未传递给冷却介质的损耗；P'_e为基准外围部件对空气交换的能量；P'_m为发电机轴承总损耗；P_m为轴承总损耗；G_F为发电机转子重量；G_S为水轮机转子重力和水推力之和。这些损耗均可通过几项专门试验结果算出。GB/T 5321—2005《量热法测定电机的损耗和效率》中对此法有具体的规定或建议。



基准表面示意图

1—辐射至墙壁，对流至周围空气；2—控制装置表面；3—励磁；4—推力轴承冷却器；5—冷却空气；6—主冷却器；7—传至基础；8—传至水轮机转子

直接测量法　直接测量时发电机的总损耗公式为

$$\Sigma\Delta P=P_{cm}+P_{mc}+P_e+P_{mg}+P_g$$

式中 P_{cm}为磁回路中的损失（铁损）；P_{mc}为定子线路损失（铜损）；P_e为励磁损失；P_{mg}为机械损失；P_g为附加损失。这些损失可通过发电机在电动机状态下的空载特性试验和3种（无励、有励开路和有励短路）试验直接测知或计算得出。

shuilun fadianji zhengfa lengque

水轮发电机蒸发冷却

（evaporative cooling of hydrogenerator）　将液态介质通入水轮发电机定子导体内部进行蒸发自循环冷却的方式。蒸发冷却的特点是：①由于冷却介质蒸发时的导热能力比空气和水高出几倍，在相同条件下采用蒸发冷却可以减小机组尺寸，减轻机组重量；②蒸发量随负荷大小变化，具有明显的自调节能力，绕组温度分布均

匀，延长了绝缘寿命；③充分利用冷却介质在液态及气态条件下的重力差或离心力（前者适用于定子，后者适用于转子）作为循环动力，实现了自循环冷却过程；④冷却介质具有良好的绝缘性能和化学惰性，还具有不燃、不爆、稳定、无毒、无腐蚀、气化温度低等优点。

蒸发冷却比水内冷更具优越性，液态冷却介质从位于上机架附近的冷凝器引出，由定子绕组底部进入导体内部，吸热后气化产生气泡，形成液、气两相混合的流体，其密度小于未气化液体的密度，故在流动压头作用下沿导体向上流动，从定子绕组顶端引出至冷凝器，经二次冷却水冷凝为液体循环使用。对于转子，由于存在离心力的作用，使自循环冷却效果更为显著。

国外的蒸发冷却研究始于20世纪60年代初期，苏联、日本、美国、英国不断发表有关研究成果的文献。蒸发冷却技术属于中国自主知识产权技术。中国开展蒸发冷却研究始于1958年，1983年云南大寨水电站投运了两台11.8MV·A定子绕组蒸发冷却水轮发电机，1991年陕西安康水电站投运了一台60MV·A定子绕组蒸发冷却水轮发电机，单机容量为444MV·A的大容量定子绕组蒸发冷却水轮发电机已于1999年在李家峡水电站投入运行。三峡地下电站单机额定容量为778MV·A、最大容量为840MV·A，是世界上最大的采用蒸发冷却的水轮发电机。

shuilun fadianji zhongxingdian jiedi zhuangzhi

水轮发电机中性点接地装置

（neutral earthing device of hydro-generator） 水电站发电机中性点接地回路的电器和装置的总称。用于限制水轮发电机定子绕组接地故障电流或保护动作于跳闸停机，以避免发电机定子绕组绝缘遭到损坏。发电机中性点接地方式与发电机额定电压、单相接地故障电流、过电压水平、保护配置等有关，直接影响发电机定子绕组绝缘、机组运行安全、供电的可靠性和连续性。不同的接地方式组成不同的中性点接地装置。

水轮发电机中性点接地方式有直接接地、经低阻抗接地、不接地或经电压互感器接地、经消弧线圈接地、经高电阻接地等类型，大中型水轮发电机组中性点常采用经消弧线圈接地和经高电阻接地。对于延时跳闸的机组，当故障电流超过允许值时，采用经消弧线圈接地方式，包括可调电感接地和固定电感（经配电变压器加电抗器）接地。对于瞬时跳闸的机组，当故障电流超过允许值时，一般采用经高电阻接地方式。高电阻接地包括直接经高电阻接地和经单相或三相配电变压器（其低压侧接电阻）接地。

经消弧线圈接地装置 经消弧线圈接地的中性点接地装置一般包括消弧线圈、电流互感器、柜体，以及发电机中性点引出线和中性点柜之间的连接导体等。

经消弧线圈接地的补偿方式有欠补偿和过补偿两种。当发电机电压系统电容电流变化不大时，采用欠补偿方式；当发电机电压系统电容电流变化较大时，采用过补偿方式。对单元接线的发电机，为限制电容耦合传递过电压以及频率变动等对中性点位移电压的影响，消弧线圈采用欠补偿方式。对带有直配线的发电机，消弧线圈采用过补偿方式，以防止运行方式改变时，电容电流减小，使消弧线圈处于谐振点运行。

消弧线圈的补偿容量与发电机额定电压、发电机电压回路的电容电流和补偿方式等因素有关。发电机电压回路的电容电流包括发电机本身、主母线、厂用分支线、变压器低压绕组等的电容电流。当回路装有直配线或电容器时，还要计及直配线的电容电流。

经高电阻接地装置 经高电阻接地的中性点接地装置一般包括单相或三相接地变压器、电阻器、电流互感器、柜体以及发电机中性点引出线和中性点柜之间的连接导体等。

发电机中性点接地变压器的容量与发电机电压回路的电容电流和变压器的工作时间有关。接地变压器的绝缘水平不低于发电机的绝缘水平，额定电压与发电机的额定电压相等。发电机中性点电阻器的功率损耗不小于发电机电压回路对地电容的无功损耗。

shuilun fadianji zhoudianliu

水轮发电机轴电流

（shaft current of hydro-generator unit） 水轮发电机在运行时，由于发电机漏磁通或磁场不对称等原因，在发电机轴的两端感应出轴电压，一旦在发电机轴的一端、轴瓦、轴瓦座和轴的另一端之间形成通路，就产生了轴电流。水轮发电机轴电压的数值较小，一般在几伏到几十伏之间。发电机在旋转时，转轴和轴瓦之间会形成一层油膜。虽然油是绝缘材料，但由于油膜很薄、绝缘性能较差，一旦轴电压击穿油膜，可能产生电火花，使轴表面与轴瓦烧损。中国丰满水电站在20世纪50年代曾发生过此类事故。

为了防止轴表面与轴瓦免受轴电流烧损，必须防止轴电压直接作用于油膜上。设计时一般在推力轴承底座加上绝缘垫，或在轴瓦背面加上绝缘，在发电机轴与轴承之间增加绝缘，在这些回路中形成较高的绝缘电阻，限制轴电流，使其不危害设备。为了提高运行可靠性，一些大型水轮发电机还装设轴电流保护装置或轴绝缘监测装置，一旦电流增大或绝缘降低，就发出信号，使机组停机。

shuilun fadianji zhuyao dianqi canshu

水轮发电机主要电气参数

（electrical parameters of hydro-generator） 表述水轮发电机性能的主要技术指标。包括额定容量、额定电压、额定功率因数、短路比、同步电抗、瞬态电抗、超瞬态电抗、负序电抗、零序电抗、时间常数、调相容量、进相容量、充电容量等。

水轮发电机额定容量 水轮发电机在额定工况下连续输出的容量。额定容量等于$\sqrt{3}$倍额定电压与额定电流的乘积，其单位为kV·A或MV·A。额定容量与额定功率因数的乘积称为额定功率，其单位为kW或MW。单机额定容量主要由电站水头及出力变化特性、枢纽布置、制造水平、运输条件、运行维护以及电力系统要求等因素确定。

水轮发电机额定电压 水轮发电机定子端连续输出的电压值，其单位为kV。发电机额定电压与容量、转速、绝缘、槽电流、冷却方式、造价等直接相关，对发电机电压设备的投资及运行费用等也有一定的影响。电压越高，绕组的绝缘也增厚，导体的占空系数降低，质量增加，成本加大。就机组而言，合适的额定电压大多与定子绕组并联支路数有关。并联支路数是转子极数的约数，应使每支路槽电流得到充分、有效的利用。槽电流的合理取值，与定子冷却方式密切相关。通常情况下，水轮发电机额定电压的变动范围在±5%以内，发电电动机在±7.5%以内。表1为不同机组容

量时选择发电机额定电压的参考值。大型水轮发电机额定电压最高已达23kV（向家坝水电站）。

表1 选择发电机额定电压的参考值

额定容量 S_N (MV·A)	额定电压 U_N (kV)
20以下	6.3及以下
20～100	10.5～13.8
80～200	13.8～15.75
180～400	15.75～18
300～700	18～20
600～900	20～24

水轮发电机额定功率因数　发电机额定功率与额定容量的比值。它对发电机本体造价、电力系统稳定、无功平衡、相关电气设备选型、发电机过负荷能力等均有较大影响。当额定有功功率一定时，提高额定功率因数可以提高发电机有效材料的利用率，提高发电机的效率，减小发电机的质量，降低造价，但电抗值增大，惯性时间常数减小，稳定性降低。水轮发电机额定功率因数与额定容量的关系见表2。

表2 水轮发电机额定功率因数与额定容量的关系

额定容量 (MV·A)	<100	100～250	250～650	>650
额定功率因数	≥0.85	≥0.875	≥0.9	≥0.925

由于采取快速励磁系统来满足稳定性要求，使得大容量水轮发电机的额定功率因数有所提高，已由原来的0.85～0.9提高到0.875～0.925。美国大容量水轮发电机的额定功率因数最高已达0.975（大古力水电站）。卧式灯泡式水轮发电机已达0.95以上。

短路比　空载额定电压时的励磁电流与三相稳态短路电流为额定值时的励磁电流之比。它可直接影响电力系统静态稳定和发电机充电容量，与发电机重量和成本有关。通常短路比越大，静态稳定极限就越高，电压变化率越小。另一方面，增大短路比将使发电机转子用铜量增多，增加成本。水轮发电机的短路比一般为0.9～1.3。随着发电机快速励磁系统和快速继电保护等技术的发展和成熟，大容量空冷水轮发电机的短路比取值呈下降趋势。

同步电抗　正常稳定运行时发电机呈现的电抗。分直轴与交轴两类，直轴呈现的电抗称直轴同步电抗，以 x_d 表示；交轴呈现的电抗称交轴同步电抗，以 x_q 表示。由于水轮发电机转子磁极为凸极结构，直轴参数为常用。如不计饱和，直轴同步电抗与短路比互为倒数。在电磁负荷已定的条件下，直轴同步电抗主要取决于气隙长度。气隙越长，短路比越大，直轴同步电抗越小。直轴同步电抗决定了发电机最大输出功率或静态稳定极限，其值越小，静态稳定极限越高，电压变化率越小。直轴同步电抗的不饱和值一般为0.95～1.3（标幺值）。正常运行时发电机处在饱和状态，直轴同步电抗的饱和值比不饱和值减小20%～30%。在进相或充电运行时发电机处在欠励磁运行，直轴同步电抗为不饱和值。

瞬态电抗　发电机端部突然三相短路时，阻尼绕组产生的自由电流衰减后呈现的电抗。直轴呈现的电抗称直轴瞬态电抗，以 x'_d 表示；交轴呈现的电抗称交轴瞬态电抗，以 x'_q 表示。在电磁负荷确定的条件下，直轴瞬态电抗主要由定子绕组和励磁绕组的漏抗值决定，x'_d 的变化对发电机动态稳定极限及突然加负荷时的瞬态电压变化率有重大影响，减小 x'_d 可以提高动态稳定储备系数。减小 x'_d 主要是减小电负荷，即要增加定子铁芯的长度或直径，提高了机组造价（大致与 $1/x'_d$ 成比例）。对液体介质内冷的大容量发电机，由于电负荷大大提高，通常 x'_d 要比空冷的略大。为避免 x'_d 过大，在机组结构设计时应尽量降低定子绕组和励磁绕组的漏抗。空气冷却水轮发电机 x'_d 不饱和值大致为0.25～0.35，水内冷水轮发电机的不饱和值大于0.4。饱和值约为不饱和值的0.9倍。

超瞬态电抗　有阻尼绕组的发电机在突然短路的初瞬间（$t=0$）呈现的电抗。直轴呈现的电抗称直轴超瞬态电抗，以 x''_d 表示；交轴呈现的电抗称交轴超瞬态电抗，以 x''_q 表示。x''_d 值取决于阻尼绕组的结构形式及定子绕组的漏抗，并近似等于阻尼绕组漏抗与定子绕组漏抗之和。它是计算短路电流的重要数据，对选择电站电气设备有重要影响。x''_d 值越小，短路冲击电流值越大，作用于绕组端部上的力越大。x''_d 还对发电机的异步力矩略有影响。由于阻尼绕组的漏抗值很小，故改变 x''_d 值比改变 x'_d 值更困难。水轮发电机的 x''_d 不饱和值大致为0.16～0.26，饱和值约为不饱和值的0.85倍。

负序电抗　当转子正常同步旋转，励磁绕组短路，电枢绕组加上一组对称的负序电压时，负序电枢电流所遇到的电抗，以 x_2 表示。由于负序旋转磁场与转子有两倍同步转速的相对运动，随着转子相对位置的变化，负序电抗值将在 x''_d 及 x''_q 之间变化。x_2 值还与外接电抗大小有关，当外接大电抗时 $x_2 \approx 1/2\times(x''_d + x''_q)$，当外接电抗为零（机端短路）时，$x_2 = \sqrt{x''_d x''_q}$。水轮发电机的负序电抗范围为0.161～0.27。

零序电抗　当转子正向同步旋转，励磁绕组短路时，电枢通过的零序电流所遇到的电抗，以 x_0 表示。零序电流在电枢绕组只能产生漏磁通和三次谐波气隙磁通。由于三次谐波气隙磁通值不大，故 x_0 具有漏电抗的性质，并与主磁路饱和程度无关。水轮发电机的零序电抗值为0.049～0.123。

定子绕组短路时间常数　机组在额定转速下运行，当运行条件突变后，定子绕组短路电流中直流分量衰减到其初始值的1/e，即0.368倍时所需的时间。该时间常数反映了定子绕组出线端短路时，短路电流非周期分量的衰减特性，其值等于负序电抗与定子绕组电阻之比，是短路电流计算的重要参数之一，以 T_a 表示，单位为s。大容量机组由于定子绕组电流大，线棒截面大，并联支路数多，其 T_a 值比小容量机组的 T_a 值要大。水轮发电机 T_a 值范围为0.08～0.33s。

直轴瞬态短路时间常数　机组在额定转速下运行，当运行条件突变后，直轴短路定子绕组电流的渐变分量衰减到其初始值的1/e，即0.368倍时所需的时间。该时间常数反映了定子绕组出线端短路时瞬态阶段短路电流周期分量的衰减特性，以 T'_d 表示，单位为s。水轮发电机的 T'_d 值范围为1～3s。

直轴超瞬态短路时间常数　机组在额定转速下运行，当运行条件突变后，直轴短路电枢电流在开始几周内出现的迅变分量衰减到其初始值的1/e，即0.368倍时所需的时间。该时间常数反映了定子绕组出线端短路时超瞬态阶段短路电流周期分量的衰减特性，以 T''_d 表示，单位为s。水轮发电机 T''_d 值的大致范围为0.02～0.10s。

水轮发电机调相容量　机组作同步电动机运行，$\cos\varphi=0$，励磁电流为额定值时可能发出的感性无功容量，其单位为kvar或Mvar。水轮发电机调相运行时，将消耗电力系统一部分有功功率用于补偿机组的铜耗、铁耗和风摩擦损耗等，

向电力系统输送感性无功功率，以改善电力系统的功率因数。为了减小损耗，通常用压缩空气将水轮机转轮室中的水面压低，使转轮在空气中转动。水轮发电机调相运行时的容量大小与其额定功率因数和短路比有关，额定功率因数越低，则调相容量越大；额定功率因数一定时，短路比小，调相容量大。水轮发电机的调相容量为额定容量的 0.6～0.75 倍。

水轮发电机进相容量　水轮发电机在送出部分有功功率的同时，在欠励状态下吸收的最大感性无功容量，其单位为 kvar 或 Mvar。水轮发电机的进相运行主要为了满足电力系统中电压水平或无功功率平衡的需要。进相运行时，定子端部漏磁和由漏磁引起的损耗要比调相运行时增加，将导致定子端部附近金属件温度升高。另外，进相运行时，由于电动势及电压降低，输送同样有功功率时功率角要增加，容易引起机组失步。电力系统在计算系统电压水平或无功功率平衡时，应充分利用和发挥水轮发电机组的进相运行能力，并提出对机组进相能力的合理要求。通常电网要求水轮发电机在进相深度为 0.95（$\cos\varphi=-0.95$）时能长期稳定运行。

水轮发电机充电容量　水轮发电机端电压为额定值时带空载高压线路状态下，机组可能吸收的最大感性无功容量，其单位为 kvar 或 Mvar。充电运行是进相运行的一种特殊方式，即 $\cos\varphi=0$，发电机处于欠励状态运行。充电容量可通过功率特性曲线近似确定。

shuilun fadianji zhuansu

水轮发电机转速

（rotational speed of hydro-generator）　水轮发电机每分钟旋转的次数，单位为 r/min。发电机转速与电机尺寸及材质强度关系密切，通常转速越高，结构尺寸越小，对材质强度要求也越高。工程中水轮发电机转速可分为额定转速、飞逸转速和临界转速 3 类。

水轮发电机额定转速　见额定转速。

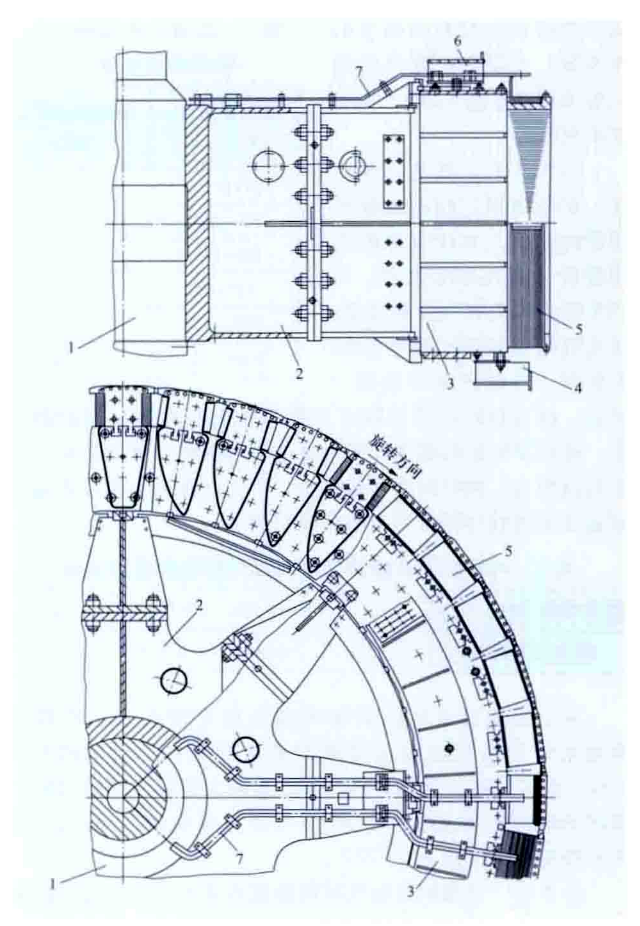
水轮发电机飞逸转速　当轴端负荷力矩为零时可能达到的最高转速。飞逸转速与额定转速之比值称为飞逸系数，其值对混流式和冲击式水轮发电机组为 1.6～2.2，对轴流式水轮发电机组为 2.0～2.6，对贯流式水轮发电机组为 2.8～3.1。机组转动部分的结构与材料强度应满足飞逸转速下，在规定的时间内运转而不致变形损坏。

水轮发电机临界转速　机组在旋转中产生共振的转速，是指数值等于转子固有频率时的转速。水轮发电机组的临界转速在低于额定转速或高于额定转速的区域内都有可能出现。为避免机组在临界转速下共振造成破坏，在低于额定转速范围内，须在临界转速附近采用加快升速的办法，使机组迅速通过共振区；对高于额定转速的临界转速造成的机组共振，使一阶临界转速为机组飞逸转速的 1.2 倍及以上。

shuilun fadianji zhuanzi

水轮发电机转子

（rotor of hydro-generator）　水轮发电机的转动部分，由转轴、转子支架、磁轭、磁极等部件组成，用以产生磁场、变换能量和传递转矩。转子的设计、制造和安装质量直接影响机组安全稳定运行，转子要有足够的刚度、强度，良好的电磁性能和通风结构。水轮发电机转子结构如图所示。



水轮发电机转子结构

1—转轴；2—转子支架；3—磁轭；4—下风扇；5—磁极；6—上风扇；7—转子引线

转轴　与水轮机主轴连接，用于传递扭矩。转轴承受机组转动部分的重量、水推力产生的拉应力、转矩产生的剪应力和单边磁拉力引起的弯曲应力，以及转子机械不平衡力等。对于采用热套配合的转轴，还要承受径向配合力。水轮发电机转轴有一根轴结构和分段轴结构。通常高转速、中型容量悬式水轮发电机采用一根轴结构，该整段轴结构简单、制造方便、调整轴系容易。中、低速大容量伞式发电机广泛采用分段轴结构。分段轴通常由上端轴、转子支架中心体和下端轴组成。这种结构的中间一段是转子支架中心体，没有轴，因而又称无轴结构。这种结构的最大优点是可以解决由于机组尺寸大带来的大型铸锻件质量问题，另一方面可以减轻转子起吊重量，降低起吊高度，从而降低电站厂房高度，给电站建设带来一定的经济性。一般水轮发电机转轴都采用整段锻造结构，大型电机的轴做成空心的，既可减小质量，又便于检查锻件质量和补气。

转子支架　由中心体和支臂两部分组成，是连接磁轭和转轴的部件。中心体在一般悬式水轮发电机中常由轮毂与钢板焊接而成。轮毂热套于轴上，或用键固定在轴上，以传递扭矩。在半伞式发电机中，常用转子支架中心体代替中间一段轴与下端轴或水轮机轴相连。该中心体一般用钢板焊接，连同支臂组成转子支架。转子支架的结构形式主要有整体铸造式和圆盘式两种。整体铸造式转子支架结构紧凑、简单。圆盘式转子支架具有刚度大、传递扭矩大和通风

损耗小等特点，已广泛应用于大容量低转速、小容量高转速水轮发电机。

支臂是连接转子中心体与磁轭的桥梁。一般水轮发电机的支臂设计成工字形结构。大型电机为了提高抗扭刚度，节约材料，常做成盒型支臂。

磁轭　水轮发电机磁轭是电机磁路的一部分，并作为固定磁极的结构部件。磁轭设计是根据磁轭在运转时承受磁极装配及其自身质量的离心力所引起的应力来选择尺寸和材料。此外，还需要考虑一定的飞轮力矩满足水轮机调节保证的要求。磁轭分叠片和钢环整圆两种类型，大、中型水轮发电机磁轭常用4～14mm的高强度热轧钢板冲成扇形片，按一定的要求交错叠成整圆，用拉紧螺杆紧固。磁轭外缘开有"T"尾或鸽尾槽，以固定磁极。磁轭与支架之间常用径向键和切向键楔紧固定。对小型或小直径高速水轮发电机，常用锻钢或铸钢件做成整体磁轭。

磁极　水轮发电机转子磁极是产生磁场的部件，由磁极铁芯、线圈、托板、阻尼绕组等零部件组成。磁极在磁轭上的固定方式常用"T"尾、鸽尾或梳齿状结构的方式。磁极铁芯有实心和叠片两种结构。实心磁极一般采用锻钢或铸钢制成。为了满足机械强度的要求和改善发电机的特性，中容量高速发电机的转子常采用实心磁极结构。高速发电电动机的转子，为了适应频繁起动的要求，也采用实心磁极。叠片磁极常用1.5～3mm厚的钢板冲成冲片叠成，用铆钉铆合或用拉紧螺杆紧固成整体。

磁极线圈常采用裸扁紫铜排绕制或四角焊接而成，匝间垫以多层环氧玻璃坯布与铜排热压成一体。托板由环氧玻璃布板加工而成，用于承受线圈的对地绝缘。为防止高速水轮发电机磁极线圈在运行中由于线圈离心力侧向分力引起的线圈弯曲变形，常用撑块或围带固定结构。高转速、大容量水轮发电机已广泛采用向心磁极，既有可靠的机械强度，又有良好的通风散热条件。

阻尼绕组由阻尼条、阻尼环和连接片组成。阻尼条多采用软质紫铜棒制成，镶嵌在磁极铁芯的阻尼条孔内，两端伸出与阻尼环连接。阻尼环用扁紫铜带弯成扇形段，每个磁极一段，固定在磁极上下两端，通过连接片将扇形段连接成阻尼环。连接片由多层薄紫铜片制成，其外形似"Ω"，在机械力和热应力的作用下，产生一定的弹性变形。

shuilun-fadianjizu 72h dai fuhe lianxu shiyunxing

水轮发电机组72h带负荷连续试运行 (load test for 72h continuous operation of hydro-generator unit)

水轮发电机组起动试运行结束前，针对机组机械和电气部分的连续运行可靠性开展的考核性试验工作。其目的是确认机组在带额定负荷条件下能够安全、正常地连续运行，判断机组是否已具备投入商业运行条件。该项试验合格也是机组安装调试单位向运行单位移交有关机电设备的必要条件。

一般情况下，水轮发电机组72h带负荷连续试运行要求机组在带额定负荷连续运行72h。有些电站运行初期受到水头或电力系统条件限制，机组往往不能带额定负荷，则按当时条件在尽可能大的负荷下连续运行72h。如果因机组及相关机电设备的制造、安装质量或其他原因引起运行中断，则72h带负荷连续试运行重新开始。

机组72h试运行过程中，需要监测并记录机组各部位振动、摆度是否正常，各轴承油温、瓦温是否正常，监测系统运行程序是否正确，机组及其附属设备运行是否稳定和正常等。

机组72h连续试运行结束后，停机对机电设备进行全面的检查，消除并处理72h试运行中发现的缺陷，向运行单位移交机电设备，机组开始商业运行，同时开始计算机组设备的质量保证期。

shuilun-fadianjizu anzhuang

水轮发电机组安装 (installation of hydro-generator unit)

水轮机和水轮发电机的机械和电气元部件在水电站内组装成整体设备且满足质量要求的过程。分为水轮机安装和水轮发电机安装。水轮机安装包括尾水管、座环、蜗壳、导水机构、转轮、水导轴承和止水密封装置等的安装。水轮发电机安装包括定子装配与安装、转子装配、机架装配与安装、推力轴承和导轴承安装、机组轴线检查和调整等。其中，尾水管、转轮室、座环、蜗壳、定子基础和机架基础安装后均埋入混凝土中，称为埋设部件，其余为可拆卸部件。

大、中型水轮发电机组大多采用立式结构，小型机组多为卧式结构。不同的水轮发电机结构形式，安装工艺方法也不同。

立式水轮发电机组安装　大、中型机组的主要部件由于尺寸和质量大，受运输条件限制，通常分为若干瓣加工制造，运至现场再组装成整体，如座环、顶盖等；有的部件运至现场后拼装焊接成整体，如尾水管、蜗壳及大型转轮、机架和定子机座等，所以安装也是制造的延续。

安装定位　根据水工建筑物测量基准点，定出水轮机的安装中心线和标高点。水轮机中心线以水平面坐标X、Y轴表示。Y轴为机组上、下游水流方向线，X轴为贯通厂房的横方向线，X、Y轴的交点即为水轮发电机组的中心点，通过中心点的垂直线即为机组垂直中心线。

厂房上、下游墙上和左右两侧放置方位基准点和标高点，作为水轮发电机组安装定位的依据。

水轮发电机组的埋设部件按机组的中心线找正和安装高程定位，尾水管、转轮室、座环等几何圆心严格地与水轮机组垂直中心线和标高调整一致。部件上相应的X、Y方位与水轮机的X、Y轴线调整一致。

尾水管、转轮室安装　大型水轮机的尾水管一般在工地进行拼装焊接。调整好中心和高程，用拉紧螺栓固定后浇筑二期混凝土。轴流式水轮机在尾水管上方设有转轮室，其中心是机组安装中心线的基准。

座环、蜗壳安装和焊接　根据不同的座环和蜗壳结构，采用不同的安装方式。

(1) 混流式水轮机的座环安装在尾水管的上方。由于运输条件的限制，座环通常制成分瓣的结构，在现场用螺栓连接后焊接成整体。座环安装找正后，固定在支墩上。

水轮机金属蜗壳一般由多节钢板拼焊组成，每节蜗壳围绕着座环进行安装焊接，见图1。焊接完成后的蜗壳焊缝用无损探伤法检验。蜗壳安装检查合格后，在其周围浇筑二期混凝土。

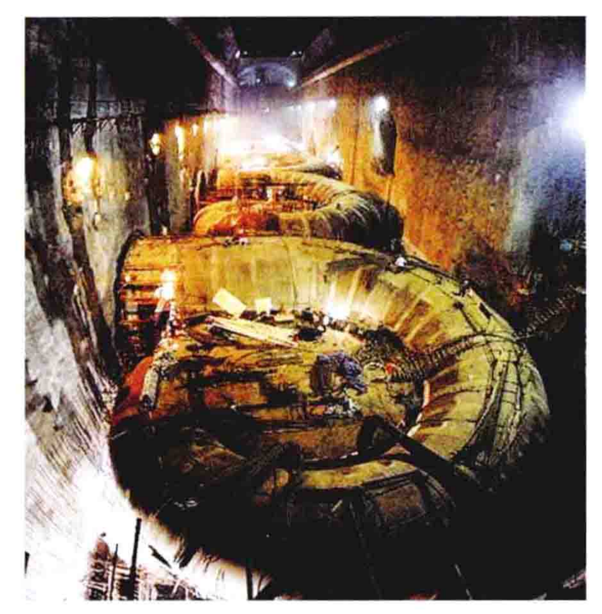


图1　蜗壳安装

采用高强度钢板制成的蜗壳，为减少焊接应力，防止焊缝产生裂纹，改善焊接质量，焊前对焊缝周围的钢板进行预加热，并在焊后进行热处理。高强度钢板焊接的蜗壳有时会要求做水压试验，通过水压试验对焊接质量进行检查，同时可以起到减小焊接应力的目的。

（2）轴流式水轮机通常采用焊接式座环和钢筋混凝土结构的蜗壳。较高水头的轴流式水轮机也有采用金属蜗壳的。

导水机构安装　导水机构由顶盖、底环、活动导叶及其操作机构组成。一般在主轴和转轮装入之前，底环、顶盖、活动导叶等先在座环上进行预装，以调整顶盖、底环及止漏环的同心度和导叶活动的灵活性，并调整研磨导叶端部间隙和立面间隙。调整好后将顶盖、底环用销钉定位，然后将预装部件全部拆出，待主轴、转轮吊入找正后，按定位销钉进行正式安装。大型混流式或轴流式水轮机的空间较大，安装人员在转轮室内可以进行导叶立面间隙调整和研磨工作。高水头机组的导水机构通常在制造厂进行预装。

转轮的组装和焊接　混流式水轮机整体制造加工的转轮在现场可以直接和主轴连接吊入机坑安装就位，见图2。受铁路和公路等运输条件的限制，直径较大的转轮制造后分两



图2　水轮机转轮吊装就位

瓣运输，在现场进行拼焊加工。一些大型水电站的转轮也有采用散件运输，现场焊接加工方式的，在现场的组焊车间组装焊接转轮，并进行热处理。

轴流转桨式的转轮、轮毂、叶片和操作机构，分件运至现场进行组装。

水轮机导轴承安装　水轮机导轴承有橡胶瓦轴承和合金瓦轴承两种。橡胶瓦轴承一般均为筒式，用水润滑和冷却，安装前检查其与水轮机主轴的配合间隙，如间隙不符合要求，可在瓦的背面用垫片调整。合金瓦轴承的瓦面一般用巴氏合金制成，用油润滑和冷却，按其构造又可分为筒式瓦和分块瓦两种，安装前要按水轮机主轴的轴颈进行研刮，要求瓦面均匀接触。水轮机巴氏合金导轴承瓦也有不经研刮直接进行安装的。

定子装配与安装　小型水轮发电机的定子在制造厂装配成整体。中型水轮发电机定子受运输条件的限制，在工厂分瓣制造并进行预组装，在现场分瓣定子合缝组装并嵌装合缝线棒。大型发电机的定子机座通常在工厂分瓣制造，整体预组装，在水电站现场整体装配、叠片、嵌线，见图3，以提高定子的圆度和刚度。

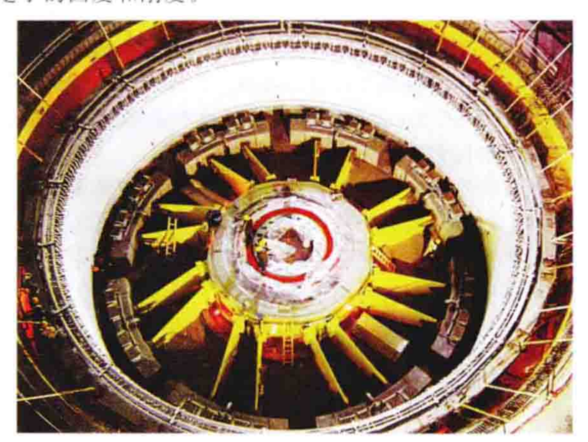


图3　绕组安装完成后的发电机定子

（1）分瓣定子装配。包括分瓣定子吊入机坑组装、调整定子铁芯圆度找正中心、嵌装合缝线棒、线棒端接头焊接、绝缘介电强度试验。

（2）定子现场整体装配。包括机座组装焊接、定位筋焊接、叠压硅钢片、嵌装线棒、端部接头焊接、绝缘介电强度试验。现场整体装配定子，一般是在安装间进行，也可在机坑中进行。叠装铁芯的硅钢片分段压紧，全部铁芯压紧后，检验压紧螺杆的紧度。

（3）定子铁损试验。在装配好的定子铁芯圆周上，缠绕励磁绕组和测量绕组，用50Hz交流电源使铁芯产生1T左右的磁感应强度。在试验的90min内，测量绕组的电压、电流，计算单位铁损值并检查铁芯各部温升情况和最大最小温度差。

（4）定子嵌装线棒。一般在机坑或安装场中进行。嵌装下层线棒和上层线棒以后，分别做工频交流耐压试验。

（5）线圈端部接头焊接。接头一般用工频或中频交流感应加热焊接。焊接工艺有磷铜钎（硬）焊和锡钎（软）焊两种。磷铜钎焊要求接头导线和连接板接触平整、间隙较小。锡钎焊要求接头导线和连接套先挂好一层薄的焊锡，装配严实。

转子装配　一般在水电站安装场装配，包括竖轴和转子支架组装焊接、磁轭装压、热打键、挂装磁极和干燥、绝缘介电强度耐压试验、转子吊装。

（1）竖轴和转子支架组装焊接。主轴竖立于基础上，大型水轮发电机转子中心体一般是轴的一部分，并具有推力轴承转动体（推力头），其轮辐一般用螺栓连接于中心体上。圆盘结构的轮辐要在现场焊接。中、小型发电机转子采用轮毂加温套轴，紧固于轴上。

（2）磁轭装压。磁轭装压是转子组装中的关键工序。磁轭大都由许多扇形铁片叠压而成。扇形铁片的搭接按顺序叠放，并按磁轭总高度分段、多次、对称压紧。磁轭压紧螺杆要达到预定的紧度。

（3）热打键。磁轭和磁极在运行中有离心力，为了避免磁轭与轮臂之间可能产生间隙，一般采用磁轭加热膨胀，用热打键的方法使其具有一定的预紧力，并控制调整转子的圆度。也有采用浮动结构的转子，转子轮辐为圆盘结构，运行时磁轭与轮辐间允许有均匀的分离间隙。

（4）磁极挂装。磁极要按重量和极性分配挂装。挂装后打紧磁极键并复查转子圆度。连接磁极绕组接头和阻尼环接头。

（5）转子全部组装完后，磁极通入一定的电流，进行加热干燥。测量绝缘电阻和交流耐压试验。

（6）转子吊装。转子吊入机坑，转子法兰按水轮机主轴法兰的中心、水平和高程找正后，落在制动器上，见图4。



图4　发电机转子吊装

机架安装　机架由机架中心体和支臂组合而成，组合面靠螺栓把合，螺栓受力均匀，并有足够的预紧力。机架上牢靠固定挡风板、隔板、灭火管件等。机架在机坑外组装后吊入机坑，以主轴为中心，用水准仪测量机架水平进行安装。

推力轴承和导轴承安装　根据水轮机主轴法兰的高程，调整镜板的高程和水平。对螺栓支承的推力轴承，在机组转动部分处于中心位置、保持镜板水平的情况下，调整支承螺栓，使推力瓦受力均匀；对弹性支承的推力轴承，将转子上、下两部导轴瓦间隙调整在0.05mm以内，用制动器顶落转动部分，检测各弹性油箱的压缩值，并以弹性油箱上的支承螺栓对压缩值进行调整。旋转机组转动部分，检查镜板的轴向摆动值。推力轴承调整后，检查机组轴线，安装导轴承，并调整轴承轴瓦间隙。

水轮发电机组轴线检查和调整　机组轴线通过测量机组摆度进行检查。一般通过电动或手动盘车方式旋转转动部分，测量集电环、上导轴承、下导轴承、联轴法兰及水轮机导轴承处的摆度值。

卧式水轮发电机组安装　水轮发电机组轴横向水平放置，卧式小型混流式水轮机和冲击式水轮机安装时，在混凝土基础上先安装蜗壳体，按厂房 X、Y 轴线找正位置，调整好蜗壳体上转轮室连接尾水管的法兰面的垂直度，浇二期混凝土固定。

贯流式水轮发电机组安装　横轴卧式，安装在坝体厂房内。

（1）尾水管、座环（亦称管形座）是随厂房混凝土同时安装浇筑，其中心位置要和厂房 X、Y 轴线坐标一致，浇混凝土时随时监视变形情况，保证安装质量；管口的垂直度和平行度以及管口之间的距离要准确，外壳的组合面（或焊接缝）和管口的连接面应密封严密。

（2）主轴和导轴承在安装间组装。推力轴承和发电机侧导轴承组合装配在一起，按规定研刮轴承瓦，配好推力轴瓦垫片。在主轴上装好内配水套。用厂内桥式起重机将主轴和这些配件同时吊入机坑，通过尾水管口和座环法兰的空间，斜向伸入座环内，装在轴承支座上。

（3）导叶和外配水套在安装间平台上装配，并转动导叶检查端面间隙，使导叶轴转动灵活，然后装上导水机构和调速环。用起重机将装配好的这些部件整体吊入机坑安装就位。

（4）转轮和转轮室安装。先装下半转轮室，将组装好的转轮吊入转轮室和主轴连接，再装上半转轮室。检查转轮室和叶片间隙，符合设计要求。

连接好导水机构和转轮叶片的接力器，通入压力油，用调速器操作进行开、关试验。

shuilun-fadianjizu biansu jishu

水轮发电机组变速技术　(varying speed technology of hydro-generator unit)　对并入电网运行的水轮发电机组，改变主轴的机械旋转速度而仍能保持电网及机组安全稳定运行的技术。水轮发电机组的变速方式主要有变极变速、双转子双定子变速、定子变频变速、转子变频交流励磁变速。

变极变速是通过改变定子极数和转子极数使机组转速得以改变的变速方式，一般为两挡。定子、转子极数改变时，仍要使它们的极数相同。双转子双定子变速采用同轴的双套发电机定子和转子，各对应一个转速。定子变频变速是在发电机出口设容量相当的变频器，使机组转速能在一定范围内连续变化的变速方式。转子变频交流励磁变速是在发电机转子三相绕组回路设变频器，变频器输出频率在一定范围内变动的交流电进入转子，使机组转速能在一定范围内连续变化的变速方式。

恒速水轮机效率是随水头和负载变化的，随着水轮机效率的降低，恒速运行还会引起尾水管脉动和空蚀恶化，若保持水轮机的高效率运行则需改变转速。因此，从20世纪40年代起就有专家提出水轮机变速运行的设想。抽水蓄能电站一般库容不大，发电水头和抽水扬程的变化范围较宽，为了满足抽水蓄能机组在较大水头（扬程）变化范围内运行的要求，首先在抽水蓄能机组上采用了变速技术。变极变速是最早应用于发电电动机的变速方式，随后经历了双转子双定子变速—定子变频变速—转子变频交流励磁变速的发展过程。

转子变频交流励磁变速方式的原理是基于并网运行的变速机组对电力系统电气同步的特性，根据上述要求有

$$n_o = n_m + n_e$$

式中n_0为同步转速；n_m为转子的机械转速；n_e为转子内变频交流励磁电流所形成的磁场转速。若$n_e=0$，相当于转子内通以直流，转子的机械转速等于同步转速，即恒速同步机的特性。若$n_e \neq 0$，因电力系统同步转速n_0不变，n_e改变，n_m也随之相应变动。$n_e>0$，则转子的机械转速小于同步转速，$n_e<0$，则转子的机械转速大于同步转速。

转子变频交流励磁变速机组控制复杂，可调节量多，如转速n_m是可调节量，交流励磁电流的频率、相位均可调节。此外就是调节的方式多。以并网运行发电工况为例，恒速机组只通过调节导叶开度的办法来调节发出的有功功率，而变速机组则既可采用调节导叶开度的办法来调节发出的有功功率，也可通过调节交流励磁电流来实现。变速机组的转速既可通过调节导叶开度的办法来实现，也可通过调节交流励磁电流的频率来实现。基于上述原因，变速机组需要采用高可靠性的高速数字控制系统。

转子变频交流励磁变速技术在20世纪70年代开始进行工业试验，80年代末技术上已经成熟并逐步得到应用。这种变速方式除能适应水头和负载的变化，提高水轮机效率，拓宽水轮机运行范围，减少振动和空蚀外，还能有效地改善电力系统的安全稳定运行状况，如其可通过调整转子交流励磁电流实现有功功率的快速调节。对抽水蓄能机组水泵工况，通过调整转速，可改变输入功率，使其参与电网频率自动控制。世界上已投运的最大容量转子变频交流励磁变速机组是日本大河内电站395MV·A抽水蓄能机组，德国2003年投产的金谷抽水蓄能电站采用两台变速抽水蓄能机组（单机容量为265MW）。日本在葛野川电站单机容量为412MV·A的4号机组上将采用转子变频交流励磁变速机组（计划2014年投运）。转子变频交流励磁变速技术先进，是一种有良好发展前景的变速方式，主要应用在抽水蓄能机组上。

中国的岗南抽水蓄能电站（1968年第一台机组投运）、密云抽水蓄能电站（1973年第一台机组投运）、响洪甸抽水蓄能电站（1997年7月第一台机组发电，1997年12月竣工）均采用了变极变速机组，潘家口抽水蓄能电站的发电电动机组采用了变极与定子变频联合变速的方案，1991年该电站第一台抽水蓄能机组投运。

shuilun-fadianjizu binglie ji fuhe shiyan

水轮发电机组并列及负荷试验 (synchronous and load test of hydro-generator unit) 水轮发电机组起动试运行过程中，对机组同步并网以及带负荷时机械和电气的试验工作。主要试验内容有并列试验、机组带负荷试验、机组甩负荷试验，有时根据机组设计要求和机组合同要求，还需完成水轮发电机组调相运行试验、水轮发电机组最大出力试验等。水轮发电机组并列及负荷试验的目的是检验机组及其附属设备和各辅助设备在并网，以及不同负荷工况下的运行情况。

并列试验　机组通常都装有手动准同步装置和自动准同步装置，以实现与电力系统并网。同步回路检查是在发电机空载时将发电机电压通过两组电压互感器接到手动准同步装置或自动准同步装置内，此时同步表或同步装置指示应正确，同时在两组电压互感器的二次侧检查相序并定相，证明同步回路接线正确。同步回路试验是在断路器断开的情况下将系统电压与发电机电压两个不同的电源引入手动准同步装置，此时同步表的指针将顺时针或逆时针方向旋转，表示机组的频率大于或小于电力系统频率。调整机组的频率和电压，使之与电力系统的频率和电压基本相等，同步表的指针旋转趋慢；当接近同步点，超前相角差大约相当于断路器合闸时间的相角差时，即可投入断路器与电力系统并网。试验自动准同步装置时可以用示波器录制示波图。

对于设计采用自同步方式并网的机组，还应进行自同步并网试验。试验开始时机组处于停机状态，然后自动开机，当机组转速对应的频率接近电力系统同步频率时，通过频率差继电器或转速继电器将断路器投入，然后合上励磁开关，机组即可拉入同步，可用示波器录制机组自同步过程主要参数的示波图。

机组带负荷试验　机组带负荷试验时有功负荷逐步增加，检查各仪表指示是否正确，机组各部温度、振动、摆度是否符合要求，机组运转是否正常，观察在各种工况下尾水管补气装置的工作情况，记录在当时水头下的机组振动区及最大负荷值等，并进行机组快速增减负荷试验。机组带负荷后应分别对调速系统和励磁装置进行试验，并记录各种试验数据。机组带额定负荷下，一般还要进行调速器低油压关闭导叶试验、事故配压阀关闭导叶试验、动水关闭工作闸门或关闭进水阀（筒形阀）试验等。调速器低油压关闭导叶试验的目的是检验机组在带额定负荷时导叶在规定的最低油压下是否能正常关闭。试验方法是将机组并入电力系统并带上额定负荷，油压装置的油泵停止运转，人为地降低油压装置的油压和油位到设计规定值，低油压继电器动作关闭导叶。为了保证机组的安全，试验时与电力系统不解列，以避免导叶不能关闭时可能发生转速上升过高的事故。

机组甩负荷试验　甩负荷试验的目的是检查当机组甩负荷时，水轮机调速器和励磁调节器的动态特性和检验蜗壳压力上升率与转速上升率是否符合设计要求。对于转桨式水轮发电机组甩负荷，还要检查调速系统的协联关系和分段关闭的正确性，以及突然甩负荷引起的抬机情况。甩负荷试验一般甩有功负荷。甩负荷试验按额定有功功率的25%、50%、75%、100%分4个阶段进行。对于并入电网的机组，甩负荷的方法是机组带上预定的负荷，跳开发电机断路器或主变压器高压侧断路器，突然将负荷甩掉，此时要记录机组的负荷、转速、蜗壳压力、顶盖及尾水管真空压力、导叶开度、接力器行程、各轴承温度、机组各部位的摆度和振动以及上下游水位等。试验过程中记录甩负荷前后的数据及甩负荷过程中出现的最大值，并计算蜗壳压力上升率、机组转速上升率和调速器的残留不平衡度。

水轮发电机组调相运行试验　根据电力系统的需要，要求一些水电站机组作调相运行，向系统提供无功功率。试验时先起动水轮发电机组与系统并列，然后将导叶关至全闭，机组即转入调相工况运行。机组本身消耗的有功功率由系统提供。为了减少有功功率消耗，电站需装设一套压缩空气系统和管路，利用压缩空气将水轮机转轮室内的水位压低，使转轮在空气中旋转，此时所消耗的有功功率仅为在水中的1/10左右。试验时记录机组的无功功率、定子电压、定子电流、转子电压、转子电流、有功功率及各轴承温度、机组各部位的摆度和振动。

水轮发电机组最大出力试验　设置最大出力的机组，需使机组增负荷至最大功率，并逐项检查考核机组在最大出力

下的各项性能指标。

shuilun-fadianjizu bu duichen yunxing

水轮发电机组不对称运行 （unbalanced operation of hydro-generator unit） 水轮发电机组每相负荷的电流值及其相角处于互不相等情况下的一种运行方式。三相电力系统可分解为正序、负序、零序3个对称系统，对称运行时负序和零序分量为零，不对称运行时出现负序及零序分量。负序电流能引起定子绕组超温、转子附加发热和机械振动。

定子绕组超温 由于负序电流出现后，和正序电流叠加，定子绕组会有一相相电流超过额定值，从而使该相绕组温升超过允许值。

转子附加发热和机械振动 负序电流出现后，其负序旋转磁场以同步速度与转子反方向旋转，在励磁绕组、阻尼绕组以及转子本体中感应出两倍频率的电流，迫使这些部件产生附加损耗，引起局部发热。负序磁场还能在转子轴上产生两倍频率的脉动转矩，使水轮发电机组产生振动并伴有噪声。

不对称允许范围 主要取决于3个条件：①负荷最大相定子电流不超过额定电流值；②转子任何一点的温度不超过绝缘材料等级的允许温度；③出现的机械振动不超过允许范围。由于水轮发电机组结构、材料、冷却方式不同，其允许范围也不同。按照GB/T 7894—2009《水轮发电机基本技术条件》，水轮发电机组在不对称电力系统中运行时，任何一相电流不超过额定值；其负序电流分量与额定电流的比值，对于额定容量为125MV·A及以下的空冷水轮发电机，不超过12%；对于额定容量大于125MV·A的空冷水轮发电机，不超过9%；对于定子绕组水冷的水轮发电机，不超过6%。

shuilun-fadianjizu chongshui shiyan

水轮发电机组充水试验 （water filling test of hydro-generator unit） 水轮发电机组首次起动试运行前需要完成的一项试验项目。通过对输水系统充水，检查输水发电系统各个部位有无漏水，以检验输水流道的施工和机组的安装质量。水轮发电机组充水前须对尾水管、压力管道、蜗壳等进行全面清理检查，确认输水系统的闸门、阀门处于关闭状态，水轮发电机组及其辅助设备处于可以随时起动状态，电气方面的工作达到充水前的要求。水轮发电机组充水试验需分步进行，先对尾水管和蜗壳充水，然后对压力管道充水。

尾水管和蜗壳充水试验 水轮发电机组的充水试验首先是利用尾水充水阀或其他方式从下游将水引入尾水管内，在充水过程中检查尾水位以下各部位，如顶盖、导水机构、主轴密封、测压系统管路、尾水管进人门等处是否漏水。蜗壳充水过程中，监测蜗壳的压力上升情况以及水力量测系统各压力表计的读数，检查压力钢管伸缩节、蜗壳进人门、水轮机顶盖、导水机构、圆筒阀（若有）、主轴密封等处的漏水情况，观察各测压表计及仪表管接头等处的漏水情况。如充水无异常情况，充水至尾水平压后提起尾水闸门；若充水过程中发现漏水等异常情况，则需立即停止充水进行处理，必要时还需排空尾水管。

压力管道充水试验 尾水管和蜗壳充水试验完成后，从进水口或其他水源向压力管道充水。首先打开闸门充水阀向压力管道充水。一般情况下水电站首次充水要缓慢进行以便排气及检查，观察厂房内安装在引水管道上的压力。压力管道充水试验过程中，注意监测压力管道、蜗壳的压力上升情况以及水力量测系统各压力表计的读数，检查钢管伸缩节、蜗壳进人门、水轮机顶盖、导水机构、筒形阀（若有）、主轴密封等处的漏水情况，观察各测压表计及仪表管接头等处的漏水情况。在充水过程中需检查引水管道的通气孔、蜗壳排气阀排气是否畅通。长引水隧洞充水时，需防止隧洞排气时冲击进水口设备。当机组安装高程高于下游尾水位时，蜗壳充水则与压力管道充水同时进行。

shuilun-fadianjizu dongli texing

水轮发电机组动力特性 （dynamic characteristics of hydro-generator unit） 机组在能量转换过程中动力指标之间的函数关系，通常以动力指标发电机输出功率（P_g，又称机组出力）作为自变量，其他动力指标，如流量（Q）、功率损失（ΔP）、输入功率（P）、效率（η）、耗水率（q）以及微增耗水率（Δq，又称微增率）等作为因变量的曲线表示。动力特性曲线是研究机组最优运行方式的重要依据，并可指导水电站的经济运行。

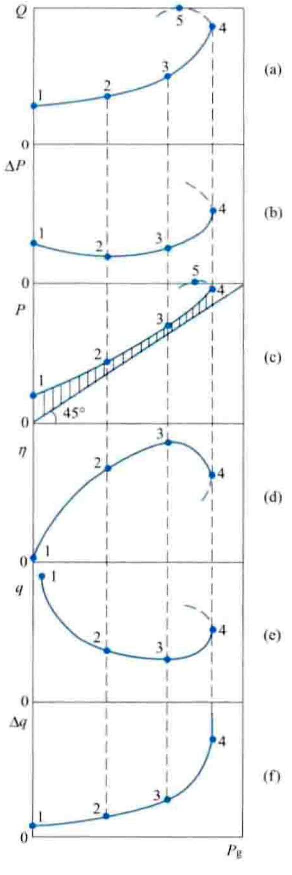
动力指标可分为绝对动力指标、单位动力指标和微分动力指标3类。

（1）绝对动力指标。以原有单位表示的动力数量，如机组水头H，单位为m；机组流量Q，单位为m^3/s；发电机输出功率P_g，单位为kW；功率损失ΔP，单位为kW。

（2）单位动力指标。如效率η，即机组输出功率与输入功率的比值，以百分数表示；耗水率q，即流量对出力的比值，单位为$m^3/(s\cdot kW)$。

（3）微分动力指标。如微增耗水率Δq，即微增流量ΔQ与其对应的微增出力ΔP_g的比值，单位为$m^3/(s\cdot kW)$。

通过原型机组在不同水头下的效率试验，可获得相应水头下机组的各项动力指标，并得到相应的特性曲线。水轮发电机组动力特性曲线如图所示，其中1为空载点，2为功率损失最小点，3为效率最高点、耗水率最小点，4为出力最大点，5为流量最大点。



水轮发电机组动力特性曲线示意图

(a) 流量特性曲线；(b) 功率损失特性曲线；(c) 功率特性曲线；(d) 效率特性曲线；(e) 耗水率特性曲线；(f) 微增率特性曲线

流量特性曲线 表示发电机输出功率与流量的关系，即$Q=f(P_g)$，见图(a)。当$P_g=0$时，相应的流量Q为空载流量，点1为空载点。超过最大出力点4后，流量虽然增加，因效率急降，出力反而减小。

该曲线可由实测得出。

功率损失特性曲线　表示发电机输出功率与功率损失的关系，即 $\Delta P=f(P_g)$，见图（b）。功率损失 ΔP 包括水力、机械、电气等损失，点 2 为功率损失最小点。该曲线可由流量特性曲线经过换算得出。

功率特性曲线　表示发电机输出功率与输入功率的关系，即 $P=f(P_g)$，见图（c）。该曲线除实测外，也可通过输入功率 $P=P_g+\Delta P$ 求得；当 $\Delta P=0$ 时，$P=P_g$，即 $P=f(P_g)$为一条与横坐标轴成 45°角的直线；当 $\Delta P\neq 0$ 时，根据 $P=P_g+\Delta P$ 的关系，将各 P_g点对应的 ΔP 叠加在 $P=P_g$的直线上，即可得实际的功率特性曲线。

效率特性曲线　表示发电机输出功率与效率的关系，即 $\eta=f(P_g)$，见图（d）。可由 $\eta=P_g/P$ 或 $\eta=1/(1+\Delta P/P_g)$ 关系作出，或由实测得出。在空载点 1 处效率为零，随着出力的增加，效率也增高，并有一个最大值点 3，超过最高效率所对应的出力后，再增加出力时，效率反会降低。

耗水率特性曲线　表示发电机输出功率与耗水率的关系，即 $q=f(P_g)$，见图（e）。耗水率为发电机单位输出功率的耗水量，即 $q=Q/P_g$。空载处耗水率极大，在最高效率相应的出力处，耗水率最小，可由计算求得。

微增率特性曲线　表示发电机输出功率与微增率的关系，即 $\Delta q=f(P_g)$，见图（f）。微增率是流量特性曲线上各工作点切线的斜率，可由计算求得。

shuilun-fadianjizu heiqidong

水轮发电机组黑起动　（black-start of hydro-generator unit）　经特殊设计的水轮发电机组仅利用机组剩余油压及厂站的直流系统作为动力实现水轮发电机组自起动，从而逐步恢复电站、电网供电。具备黑起动功能的水轮发电机组在电力系统大面积停电后对电力系统快速恢复供电具有极其重要的意义。

与火电、核电机组相比，水轮发电机组因具有辅助设备相对简单、厂用电设备少、起动速度快等特点而成为电力系统大面积停电后黑起动电源的首选；具备黑起动的水轮发电机组也是水利枢纽和电站全厂失电情况下安全生产自救的必要措施，如三峡电源电站机组就具备黑起动能力。

水轮发电机组具备黑起动功能的条件有：①机组进水口闸门处于全开位置；②油压装置主供油罐或黑起动油罐剩余油压、油位满足起动要求；③直流电源系统正常；④机组处于备用状态，主、辅设备完好。

随着电网的发展，机组黑起动已成为必备的电网事故后的电力恢复措施。2005 年 9 月，因受强风、台风侵袭，海南省电网系统瓦解，全省停电。海南电网启动黑起动预案，南丰水电站发电机组第一个黑起动成功，电力系统恢复供电。这是国内电网除试验演习外的第一次黑起动案例。

shuilun-fadianjizu ji-dian shebei jianxiu

水轮发电机组机电设备检修　（mechanical and electrical equipment maintenance of hydro-generator unit）　为保证水轮发电机组机电设备的安全、经济运行，提高设备可靠性，对机电设备进行的试验、检查和修理。检修内容主要包括：①对设备进行分解检查、测量，检查内部情况有无异常，螺栓有无松动，并进行清扫及调整；②检查水轮机叶片有无裂纹、空蚀和磨损，必要时进行补焊处理；③电气设备作预防性试验，包括水轮发电机绝缘电阻、泄漏电流、绝缘耐压试验、变压器绝缘的介质损耗因数、绝缘油耐压、绝缘油色谱分析等内容；④更换需要更换的零部件。检修方式主要有计划检修和状态检修。

计划检修　以时间为依据的定期检修方式，又称周期性检修或预防性检修。要求设备到期必修，检修时间间隔、检修工期、项目与内容需要严格按照规程规定进行。以机组检修规模和停用时间为原则，水轮发电机组的检修分为 A、B、C、D 4 个等级。A 级检修指对机组进行全面的解体检查和修理，以保持、恢复或提高设备性能。B 级检修指针对机组某些设备存在的问题，对机组部分设备进行解体检查和修理。C 级检修指根据设备的磨损、老化规律，有重点地对机组进行检查、评估、修理、清扫。D 级检修指当机组总体运行状况良好，而对主要设备及其附属系统进行消缺。根据水电站机组所在河流泥沙含量的不同，DL/T 1066—2007《水电站设备检修管理导则》对机组 A 级检修时间间隔作了规定，多泥沙水电站为 4～6 年，非多泥沙水电站为 8～10 年。在两次 A 级检修之间，安排 1 次机组 B 级检修，除有 A、B 级检修年外，每年安排 1 次 C 级检修，并可视情况，每年增加 1 次 D 级检修。

状态检修　根据监控系统、设备趋势分析系统、设备状态在线监测系统及日常巡检试验等所采集的数据和相关信息，评估设备的状况，在故障发生前进行检修的方式。状态检修能及时、有针对性地对设备进行检修，可以提高设备的可用率，并有效降低检修费用。对进口或技术引进的设备以及状态稳定的国产设备，根据设备状态评价结果，可延长检修间隔。

shuilun-fadianjizu jinxiang yunxing

水轮发电机组进相运行　（leading phase operation of hydro-generator unit）　水轮发电机组处于欠励运行，发电机定子电流超前机端电压，并从电网吸收容性无功的运行方式。随着超高压、远距离输电网络不断扩大，当系统负荷处于低谷时，将产生大量容性无功功率，导致电网电压升高，甚至超过运行电压容许的规定值，不仅影响供电的电压质量，还会使电网损耗增加、经济效益下降。水轮发电机进相运行可以吸收电网中剩余的无功功率，是解决电网电压过高的有效措施之一。

水轮发电机进相运行会导致静态稳定性降低、端部漏磁增大，引起定子端部温度升高、机端电压降低。因此，水轮发电机组进相运行能力的大小，受其静态稳定极限、定子铁芯、定子端部金属结构件的温升和定子过电流的限制，同时也受电厂厂用母线电压的限制。因此，发电机能否进相运行，应通过特殊的温升试验和稳定验算来确定。进相运行的深度取决于发电机端部结构件的发热和在电网中运行的稳定性。

shuilun-fadianjizu kongzai shiyan

水轮发电机组空载试验　（no load test of hydro-generator unit）　在水轮发电机组起动试运行过程中，机组带负荷前的机械和电气试验工作。试验内容包括机组首次手动起动试验、机组空载运行下调速系统试验、手动停机与停机后的检查、过速试验及检查、无励磁自动开机和自动停

机试验、水轮发电机升流试验、水轮发电机升压试验、机组空载下励磁调节器的调整和试验。机组空载试验的目的是，在不带负荷的情况下检查机组和调速系统、励磁系统以及其他辅助设备的制造和安装质量，消除发现的缺陷，使各项设备符合设计和规范的要求，以便进行机组带负荷试验。

机组首次手动起动及停机试验　主要目的是检查各部轴承温升和各处有无漏水、甩油、碰撞等异常现象。机组第一次起动以手动方式进行。当机组及附属设备具备首次起动条件时，操作水轮机调速器的开度限制机构缓慢地将导叶打开，使机组逐步达到额定转速。机组停机也用手动操作方式进行，当机组转速降至约30%额定转速时，打开制动闸的压缩空气阀门，使机组停机，并对起动机组及其配套设备进行检查。

机组空载运行下调速系统试验　机组空载运行下对调速器进行的试验。试验的目的是在空载运行条件下检查调速器特性和动态品质。调速器试验包括手动和自动切换试验、频率给定调整范围试验、空载扰动试验等。

过速试验及检查　机组过速试验是检查过速保护装置的动作值和机组本身在过速条件下的运行情况。过速试验用手动操作平稳地提高机组转速，达到规定值后，立即将转速降至额定值。过速试验时，记录机组各部摆度、温度和振动。试验完毕后，停机检查机组的固定及转动部分有无异常现象。

无励磁自动开机和自动停机试验　检查机组自动开机与自动停机功能的试验。机组自动开停机试验分别在机旁和中控室进行，对具有分步操作、常规控制、可编程控制、计算机监控系统等控制方式的装置分别进行。在试验过程中，需分别在现地、机旁、中控室等部位检查紧急事故停机按钮动作的可靠性。

水轮发电机升流试验　发电机出口端设置可靠的三相短路装置，采用厂用电或临时电源提供全励磁装置电源，手动开机至额定转速，在机组各部位运转正常的情况下，手动合灭磁开关，通过励磁装置手动升流使发电机定子电流升至额定值，检查发电机各电流回路的正确性和对称性，检查各继电保护电流回路的极性和相位。在发电机额定电流的情况下，测量机组振动与摆度，检查碳刷和集电环的工作情况；跳灭磁开关，录制发电机在额定电流时的灭磁示波图。在发电机升流试验过程中，还要录制发电机三相短路特性曲线，测量定子绕组对地绝缘电阻、吸收比等参数。升流试验合格后，模拟水机事故停机，拆除发电机短路点的段路装置。

水轮发电机升压试验　发电机额定转速下运行，在发电机断路器断开或主变压器低压侧连接端开断情况下，采用厂用电提供的主励磁装置电源，调整发电机转子电流使定子电压从零升到额定值，检查发电机各部位是否有异常情况。录制空载特性曲线，即发电机定子电压与转子电流的关系曲线。录制空载特性时，发电机转子电流达到额定值时，测量发电机最高电压。对于有层间绝缘的定子绕组，在最高电压下停留5min，定子电压以不超过1.3倍额定电压为限。发电机空载试验时还要进行测量表计、继电保护装置的电压回路检查，灭磁开关试验和单相接地试验并测量轴电压。

机组空载下励磁调节器的调整和试验　机组空载运行下对励磁装置进行的试验。试验的目的是在空载运行条件下检查励磁装置的特性和动态品质。励磁装置试验包括起励试验、电压调节范围试验、手动和自动切换试验、空载扰动试验以及励磁调节器的频率特性试验等。

shuilun-fadianjizu qidong shiyunxing

水轮发电机组起动试运行　(commissioning test of hydro-generator unit)　新安装的水轮发电机组完成设备分部调试后、投入生产前进行的一系列试验过程，是确认机组已具备投入商业运行条件的必要程序。水轮发电机组起动试运行一般包括水轮发电机组充水试验、空载试运行、带主变压器及高压配电装置试验、并列及负荷试验、72h带负荷连续试运行（抽水蓄能机组为15d考核试运行）以及设计与机组合同中要求进行的其他试验等内容。通过机组起动试运行过程中的一系列试验，可以对整个输水系统施工工作和水轮发电机组及其附属设备的制造、安装等方面进行全面的质量评价。（见水轮发电机组充水试验、水轮发电机组空载试验、水轮发电机组并列及负荷试验、水轮发电机组72h带负荷连续试运行、抽水蓄能机组15d考核试运行）机组起动试运行前应具备的条件主要包括：

（1）水电站的水工建筑物已基本完成，达到初期发电所要求的工程形象面貌，水库水位已达到或超过最低发电水位。

（2）引水系统，包括水电站进水口、引水明渠、引水隧洞、调压室、压力管道等已清理干净，能满足过水要求；暂不使用的压力管道闷头已装好，尾水位以下厂房与尾水的连通管路已装设防止逆流的设施；闸门及启闭机已安装完毕，经调试可满足紧急关闭要求。

（3）尾水闸门及其启闭设备已安装完毕，试验合格；厂内排水系统已安装完毕，系统运行工作正常；尾水围堰及下游集渣已按设计要求清除干净。

（4）水轮发电机组及其附属设备全部安装完毕，经调整试验和分部试运转合格；机组的公用系统和自动化系统已能满足机组试运行要求。

（5）所有电气设备经检查试验合格，可以满足机组带负荷以及测量、监视、控制和保护等的要求。

（6）有关油、气、水、消防、采暖通风等辅助设备系统安装调试完成，能满足机组运转时的要求。

（7）厂用电系统及直流系统已安装调试完毕，设备试验合格，供电电源安全可靠。

（8）升压站、开关站等土建工程现场已清理并做好围栏，确保人身安全，并能保证高压电气设备的安全送电；对外必需的输电线路已经架设完成。

（9）厂房土建工程已基本建成，能保证机电设备的正常运转；试运行机组段的厂房装修已基本完工；厂区防洪排水设施能保证安全运行。

（10）厂区照明、通信系统和对外通信已按设计要求安装调试完毕，通信可靠。

（11）电厂的生产准备工作已经就绪。

shuilun-fadianjizu shebei gaizao

水轮发电机组设备改造　(equipment upgrade of hydro-generator unit)　因设备老化、运行条件发生较大变化或技术升级等因素，通过科技手段，对水轮发电机组设备进行的修理、修型或更换工作。机组技术改造可主要针对单个设备或装置进行，也可以水轮发电机组作为一个单元进行技术改

造，不仅改造主设备，而且还改造机组的附属设备、自动化元件和装置等，以延长设备寿命，增加机组容量，使改造后的机组更加安全、稳定、可靠，自动化程度更高。主要包括水轮机技术改造、发电机技术改造及主要辅助设备技术改造。

水轮机技术改造　通过对叶片翼型进行优化修型，或更换新叶片或转轮，采用抗空化、耐磨蚀的材料，提高水轮机效率，增加机组稳定性。

发电机技术改造　通过优化发电机通风系统，更换定子、转子铁芯和绕组或采用新的绕组连接方式等措施，降低发电机的温升、振动和损耗，提高发电机效率。

主要辅助设备技术改造　对调速系统、励磁装置、监控系统、继电保护等进行的技术改造。

shuilun-fadianjizu tiaofeng

水轮发电机组调峰

(peak load regulation of hydrogenerator unit)　水轮发电机组对电力系统高峰或低谷负荷功率变化迅速做出响应的一种运行方式。由于昼夜用电负荷的不均衡性，电力系统负荷曲线形成高峰及低谷。负荷高峰时，要有机组解决高峰电力的需要，保证电力系统的供电质量（俗称“补峰”）；负荷低谷时，即使将全部可调水电、火电机组出力调至最低（包括部分水电调峰机组停机），发电容量仍会超出电力负荷的需要，需要有一种手段吸收剩余电能（俗称“填谷”）。电力系统负荷高峰时的“补峰”，可以用水轮发电机组、燃气轮机组或汽轮发电机组，但以水轮发电机组最为经济、合适。这是因为水轮发电机组具有开机、停机简单迅速，增减负荷速度快的缘故；电力系统负荷低谷时的“填谷”，只能由抽水蓄能电站机组承担，因为抽水蓄能电站机组既可以工作于发电机工况发出有功功率，也可工作于电动机状态进行抽水，吸收系统剩余有功功率。

随着分布式电能储蓄技术的发展，蓄能设备具有更加高效、快速的调节性能。随着大容量储能技术、智能电网技术的发展，在电力系统的调峰中将具有较好的运用前景。

根据相关研究，在以火电机组及核电机组为主的电力系统中，建设占电力系统容量10%～20%的抽水蓄能电站与之匹配进行调峰，是比较经济合理的。

shuilun-fadianjizu tiaopin

水轮发电机组调频

(frequency modulation of hydrogenerator unit)　水轮发电机组根据电力系统频率的变化随时调节其有功功率，以保持电力系统频率在合格范围内的一种运行方式。水轮发电机组具有调整有功功率迅速、调节有功功率范围大的优点，一般能在额定负荷的50%～100%范围内调节，因而水轮发电机组作为电力系统的调频运行机组，是其重要运行方式之一。

水轮发电机组作为调频机组，应具有水库库容大、水库进水量丰富、机组容量大等条件，具有这些条件机组可作为常年调频机组；若只是季节性水量大、调节库容有限，也可只作为季节性调频机组，而与大容量、高效率火电机组共同对电力系统进行调频。

电力系统稳态运行时频率调整方式分为一次调频和二次调频。当系统频率与设定值出现偏差时，系统中各发电机组调速器按照自身静态调节特性，实时调整水轮机导叶开度大小增减机组出力，达到维持系统频率相对稳定的调节方式称为一次调频。一次调频具有快速、自动完成的特点，属有差调节，调整结束时，频率仍偏离额定值。通过电网调度机构下令调节各电站总出力，或者电站自动发电控制（automatic generation control，AGC）、区域电网AGC方式，或者改变机组调速器调节特性等方式调节各电站出力，从而维持电力系统频率在给定值的方式称为二次调频。二次调频为无差调节，可精确调节电网频率为恒定值。

shuilun-fadianjizu tiaoxiang

水轮发电机组调相

(phase modulation of hydrogenerator unit)　水轮发电机组消耗少量有功功率维持发电机转动，只向电力系统输送无功功率的一种运行方式。由于水轮发电机组的转轮在空气中调相运行比在水中调相运行吸取更少（约10%）的电力系统有功功率，大多数水轮发电机组调相运行时多采取转轮在空气中运行。

水轮发电机组作同步调相机运行时，先以水轮发电机运行方式投入电力系统，然后关闭水轮机导叶，并把压缩空气通入水轮机室将水压下，使水轮机转轮在空气中运行，再凭借励磁调节作用（见水轮发电机励磁），向电力系统输出无功功率，起到调整电力系统电压的作用。在停止调相运行时，应首先排出水轮机室压缩空气，然后水轮发电机组与系统解列，并按照水轮发电机组正常停机流程停机。

水轮发电机组进行调相运行的特点是起动快、消耗电力系统功率小、转换方式灵活。

水轮发电机作调相机运行时，其调相容量一般为其额定容量的65%～80%。

shuilun-fadianjizu tingji zhidong

水轮发电机组停机制动

(braking system of hydrogenerator unit)　使机组在停机过程中缩短低转速惰行时间的技术措施。采用停机制动可以缩短机组停机时间，有效防止在低转速下水轮发电机推力轴承因油膜破坏而被烧损。常采用的有机械制动、电气制动及混合制动3种方式。

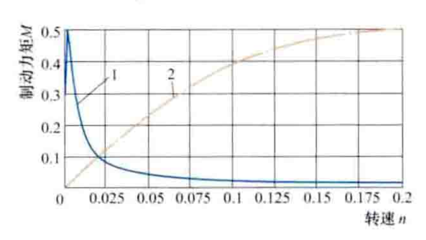
机械制动　由制动器、制动柜、管路和监测元件组成。采用巴氏合金瓦的水轮发电机组停机机械制动是在机组转速降到额定转速的20%～30%时，采用塑料瓦的水轮发电机则是在机组转速为额定转速的10%～20%时，用0.5～0.7MPa压缩空气顶起制动器的制动块，使之与固定在发电机转动部分上的制动环相接触，形成摩擦制动。机械制动具有简单、通用性强等优点，但存在制动块磨损快、噪声大以及磨损产生的粉尘污染绝缘等缺点。主要改进措施有：①改进制动器结构和制造工艺，采用将顶起转子用的油管路与制动用的气管路分开的结构；②采用制动块具有可靠返回性能的制动器；③从结构上设密封罩和吸尘器；④改进制动块的材质，使之不易产生粉尘等。机械制动方式是水轮发电机普遍采用的一种制动方式。

电气制动　水轮发电机组停机电气制动是在发电机定子外部三相短路条件下，转子回路输入恒定的励磁电流，利用定子绕组产生的能耗使机组制动停机。电气制动可以通过定子外部三相直接短路、定子三相外接附加电阻短路等方法实现。由于定子三相直接短路制动比较简单实用，可用于转动

惯量较大的水轮发电机或起动和停机频繁的发电电动机。电气制动具有制动力矩大、无磨损、无污染、维护工作量小等优点，它需要制动励磁电源及三相短路开关设备，增加了设备投资及布置场地，常用于起停频繁的调峰机组和抽水蓄能机组。因发电机内部电气事故不允许电气制动投入，故在采用电气制动时仍需保留机械制动。

水轮发电机组停机电气制动力矩特性如图所示。

混合制动　由于机械制动和电气制动在特性上的差异，有时采用一种制动方式不能满足要求，需要采用两种制动方式组合的混合制动方式。对于高转速机组，当转动部分的转速降到50%额定转速时先投入电气制动，降到5%额定转速时再投入机械制动。混合制动方式可进一步缩短停机时间，已广泛用于对制动时间有要求的机组上，特别是抽水蓄能机组基本都设置电气制动加机械制动的联合制动。



水轮发电机组停机电气制动力矩特性
1—定子三相直接短路；
2—定子三相外接附加电阻短路

shuilun-fadianjizu zaixian jiance xitong

水轮发电机组在线监测系统 (on-line monitoring system of hydro-generator unit)

通过传感器实时监测水轮发电机组主要部位运行状态，并能对运行状态参量异常进行报警的系统。水轮发电机组在线监测系统通常采用开放、分层分布式系统结构，一般由传感器单元、数据采集单元、上位机单元、网络设备等组成。

水轮发电机组在线监测系统的监测量通常包括水轮发电机组的状态参量、过程参量以及工况参量。状态参量从现场在线监测传感器直接获取，包括机组各部位的振动摆度、轴向位移、压力脉动、空气间隙、磁通密度、定子绕组的局部放电脉冲等。状态检测量传感器安装的数量可根据机组结构形式、机组容量大小有所不同。过程参量一般包括各部轴承轴瓦瓦温、油温、油位，以及冷却水温度、定子铁芯温度等，通常采用通信方式从计算机监控系统获取。工况参量一般包括转速、有功功率、无功功率、励磁电流、励磁电压、定子电压、定子电流、导叶开度等，从相关设备直接获取。

水轮发电机组在线监测系统的主要功能包括状态量越限报警、机组运行工况分析与报警、机组试验过程状态量记录与分析、机组辅助动平衡计算、盘车试验、确定机组稳定运行区等。

shuilun-fadianjizu zhendong

水轮发电机组振动 (vibration of hydro-generation unit)

由水力、机械或电气因素引起的水轮发电机组的周期或非周期振动。振动的幅值取决于激振力的大小和振动部件的刚度及动力响应特性，与水轮发电机组的工况、结构设计、制造、安装和维修质量有关。机组振动幅值需符合相关规定，振动幅值过大将会造成不良后果，如零部件疲劳断裂、转动部分与固定部分的碰擦、尾水管里衬的开裂，以至危及厂房建筑物的安全。

引起振动的水力因素　主要有尾水管涡带、卡门涡街、止漏环间隙不均、转轮叶片进口水流冲击和脱流、导叶后压力脉动等（见水轮机压力脉动）。

引起振动的机械因素　主要有转子不平衡，轴线弯曲或不对中，定、转子碰磨，轴承缺陷，定子铁芯松动等。

转子不平衡　表现为转子轴心轨迹为圆或椭圆，振动频率以转频为主，振幅与转速平方成正比。

轴线弯曲或不对中　表现为在转频、2倍频和3倍频处出现稳定的峰值，具有较大的轴向和径向振动，振幅随负荷的增加而增加，与转速变化关系不大。

定、转子碰磨　振动频率为转频或转频的倍数，波形为削顶波。

轴承缺陷　机组振动大小随机组所载负荷的变化而变化，水轮机轴的摆度较大。

定子铁芯松动　一般表现为铁芯局部松动、铁芯整体松动及压指松脱的现象。

引起振动的电气因素　主要有气隙不均、励磁绕组匝间短路、谐波共振等。

气隙不均　转子和定子之间存在不均匀的气隙可产生频率等于转频或转频整倍数的振动。

励磁绕组匝间短路　表现为发电机输出无功减少，定子相电流也有所减小，但仍以对称基波为主。

谐波共振　电枢反应中产生的谐波频率与定子绕组端部整体模态频率或定子铁芯固有频率接近引起共振，导致定子绕组松动或铁芯振动偏大。

水轮发电机组机械振动标准　GB 8564《水轮发电机组安装技术规范》规定了运行机组振动水平的限值，该限值同时也是机组结构部件振动计算的控制指标。

振动测量、振动试验和振动在线监测　振动测量是指用一定的仪器设备把表示振动的量（振动位移、振动速度或振动加速度）测量下来。仪器设备（传感器、测量仪器）的参数（如灵敏度、线性量程等）要适应不同振动量对振幅、频率和相位测量的要求。

振动试验是指在一定工况下对机组上有代表性位置处的振动进行测量，为了解机组的振动情况、查明振动规律和原因提供依据。一般振动试验的项目、试验工况、测点位置、测量仪器的选择、试验数据的分析方法等详见GB/T 17189《水力机械（水轮机、蓄能泵和水泵水轮机）振动和脉动现场测试规程》。

振动在线监测是指在正常运行状态下对能反映机组振动状态和振动量值的部位进行连续的振动测量、记录和分析。用于了解机组当时的振动量值和一段时期以来的发展趋势，为实现机组的状态检修提供依据，也为分析可能或偶然出现的异常振动的原因提供条件。

shuilun-fadianjizu zhouxian tiaozheng

水轮发电机组轴线调整 (axis adjustment of hydro-generator unit)

通过修刮或加垫等方法消除水轮发电机组轴线存在曲折或不对中的问题，实现机组轴线与机组旋转中心线重合的工作。通过机组轴线调整可消除因机组轴线与旋转中心线不重合引起的较大磁拉力和水力不平衡，降低机组振动、摆度值。轴线调整一般包括轴线测量、轴线垂直

度调整和轴线同心度调整3个步骤。

轴线测量　轴线测量的方法就是盘车，主要有人工盘车、机械盘车和电动盘车3种。一般是以上导限位作支点，通过机械或电动方式使主轴旋转，在机组主轴转动的一周中按等分8点停留，同时用安设在上导、下导、法兰、水导等处的百分表，测量其摆度值，从而测得轴线对推力镜面的不垂直度与法兰处的曲折度，为进行轴线处理提供数据。

轴线垂直度调整　若机组轴线与镜板面和法兰结合面的不垂直度超过规定值，可通过酸洗法、修刮法和加垫法进行轴线处理，减小轴线曲折度。

在水轮发电机组安装中，也可采取分别进行盘车和处理的方法。先对发电机进行单独盘车，将发电机轴线处理合格后，再与水轮机轴相连进行整体盘车，处理法兰结合面，使水导轴承处摆度调整至合格范围内。

轴线同心度调整　轴线同心度调整的目的是使机组轴线与旋转中心线尽可能地重合，使机组轴线的摆度值满足GB 8564—2003《水轮发电机组安装技术规范》的规定值。经过调整，一方面使发电机转子旋转中心与定子中心同心，水轮机转轮旋转中心与固定止漏环同心；另一方面使推力轴承各瓦的受力均衡，各导轴承的中心同心，使机组转动部分在机组中心运行。机组轴线调整合格后的摆度值应满足下表的规定。

机组轴线的允许摆度值（双振幅）

轴名	测量部位	摆度类型	轴转速 n (r/min)				
			$n<150$	$150\leqslant n<300$	$300\leqslant n<500$	$500\leqslant n<750$	$750\leqslant n$
水轮机轴	导轴承处轴颈	相对摆度（mm/m）	0.05	0.05	0.04	0.03	0.02
发电机轴	上、下轴承处轴颈及法兰	相对摆度（mm/m）	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02
	集电环	绝对摆度（mm）	0.50	0.40	0.30	0.20	0.10

注：1. 绝对摆度是指在测量部位测出的实际摆度值。
2. 相对摆度是绝对摆度（mm）与测量部位至镜板距离（m）的比值。
3. 在任何情况下，水轮机导轴承处的绝对摆度值不得超过规定值：转速在250r/min以下的机组为0.35mm；转速在250～600r/min的机组为0.25mm；转速在600r/min及以上的机组为0.20mm。
4. 以上均指机组盘车摆度，并非运行摆度。

shuilun-fadianjizu zhuandong bufen pingheng jiaozheng

水轮发电机组转动部分平衡校正

（dynamic rotor balancing of hydro-generator unit）　根据转子支持部件（轴承）的振动幅值和不平衡力的大小成正比这一原理，通过在发电机转子上进行配重，校正由水轮发电机组转子、转轮等转动部件质量分布不均产生的整体机械不平衡。对立轴机组，可根据轴的摆度进行平衡校正。不平衡可分为静不平衡、力偶不平衡和动不平衡，转速低于0.7倍一阶临界转速的机组，常进行单断面配重调整，使用三次起动平衡校正法；大中型水轮发电机组的转速较低，且转子高宽比通常小于1，很少进行双断面不平衡调整；对于需要进行双断面不平衡调整的机组，调整方法见《火力发电卷》转子动平衡。

水轮发电机组三次起动平衡校正法：

（1）第一次起动运转在原始状态下进行，通过振动或摆度的测量可确定不平衡力的方位及振动、摆度幅值 A_0。

（2）第二次起动运转时，在转子的轻侧和已知半径处加已知的配重。第一次试加的配重 W 可按式（1）估计

$$W=(0.5\sim2.5)^{\frac{mg}{n_N^2 r}}\quad(\mathrm{kg})\tag{1}$$

式中 m 为发电机转子质量，kg；g 为重力加速度，m/s²；n_N 为额定转速，r/s；r 为试加配重半径，m。

比较两次测量结果的变化可确定：①配重灵敏度或影响系数（单位配重引起的振幅变化）；②不平衡力的大小；③试加配重大小和方位的偏差。

影响系数 α 的计算公式为

$$\alpha=\frac{A_1-A_0}{W}\tag{2}$$

式中 A_0 为原始状态下测得的振摆幅值和相位；A_1 为加配重 W 后测得的振摆幅值和相位。

（3）第三次起动，根据前两次试验结果根据式（3）计算所需配重 P，并加在所求得的方位上。

配重计算公式为

$$P=W\frac{A_0}{|A_1-A_0|}\tag{3}$$

shuilun-fadianjizu zidong kongzhi

水轮发电机组自动控制

（automatic control of hydro-generator unit）　自动实施水轮发电机组工况转换、调节机组的有功负荷和无功负荷、自动监视机组的各种运行参数的控制技术。它以计算机监控系统为核心，通过水轮机调速器、励磁调节器、自动化元件和机组辅助设备，根据控制指令自动完成机组工况转换、负荷调整、安全监视和保护。控制机组的指令，由上级调度所或电站的计算机监控系统发出或由运行人员手动给出。水轮发电机组的有功和无功负荷调整分别见水电站自动发电控制、水轮机调速器、水电站自动电压控制和水轮发电机励磁。

工况转换　机组工况有静止、发电和调相，三者之间的相互转换如图所示。

静止转发电　当具备开机条件时，给处于静止状态的机组发出开机指令，机组即按既定程序将各辅助设备投入运行，调速器调整开度限制器至起动开度，水轮机导叶逐渐打开，水轮机带动发电机转动，满足条件后机组与电力系统同步并列（见同步系统）。机组并入电力系统后，开度限制器全开，机组按给定值带负荷运行。

发电转调相　给发电运行的机组发出调相指令后，首先通过调速器将机组负荷减至空载，并将水轮机导叶全关。为了减少水阻力引起的损耗，向转轮室送入压缩空气压水，使

转轮脱离水而在空气中旋转。此时机组从电力系统吸收少量的有功功率，发出无功功率。

调相转发电　给处于调相运行的机组发出指令后，首先关闭向转轮室充气和补气的阀门，开启转轮室排气阀，使转轮室充满水。通过调速器将导叶开至起动开度，机组带上给定负荷，转为发电运行。

静止
发电
调相

水轮发电机组工况转换示意图

发电转静止　此工况转换有正常停机和事故停机两种。①正常停机时，先减负荷至空载，以避免突然甩负荷造成的过速并减轻对电力系统的扰动。导叶关至空载后，跳开发电机断路器，与电力系统解列，并将导叶关至全关。转速下降到整定值时投入制动，使机组转速继续下降至全停。稍后，机组的所有辅助设备恢复到开机前准备状态。②电气事故时，为减轻设备损坏，机组立即与电力系统解列甩掉全部负荷，同时关导叶停机。机械事故时，将导叶快速关至空载后，跳开发电机断路器，与电力系统解列。事故停机在关导叶后投入制动等过程与正常停机相同。

静止转调相　当具备开机条件时，给处于静止状态的机组发出开机指令，机组先按静止转发电的控制程序起动，与电力系统并列。此后，按发电转调相的流程将机组转为调相运行。

调相转静止　给调相运行的机组发出控制指令后，首先通过调速器将导叶开至起动开度，停止供气，使机组转为发电运行，然后按发电转静止流程停机。

安全监视和保护　水轮机组的轴承过热、调速器油压装置油压事故下降、机组过速、发电机电气事故、振动摆度越限等事故均需事故停机。其中，机组过速和事故停机过程中导叶剪断销剪断，还需关闭水轮机前的进水阀门或快速闸门。

在大中型水电站中，广泛采用过速限制器，作为机组甩负荷而调速器失灵时防止机组飞逸的保护，在调速器拒动情况下迅速封闭来自调速器主配压阀的油路，将压力油直接导至接力器的关闭侧，关闭导叶。

机组各轴承及冷却器温度升高、轴承油槽及油箱油位不正常、轴承冷却水中断、轴电流增大、水轮机顶盖水位过高、水导轴承密封水压力降低、剪断销剪断、开机和停机过程未完成等异常情况发生时，发出报警信号。

shuilunji

水轮机

水轮机　(water turbine; hydraulic turbine)　将水流的能量转换成旋转机械能的水力机械。在水电站中，水轮机带动发电机将水流能量最终转换为电能。水轮机和发电机的成套设备称为水轮发电机组。

类型　根据水轮机转轮所转换水流能量的形式不同，水轮机可分为冲击式水轮机和反击式水轮机两大类。

(1) 冲击式水轮机。水流能量仅以动能形式作用于转轮，并转换为旋转机械能，其转轮上的水斗或轮叶受到由喷嘴射出水柱的冲击而使转轮旋转。冲击式水轮机根据射流进入转轮的方向不同分为切击式（水斗式）、斜击式、双击式3种，切击式一般用于500m以上的高水头水电站，斜击式和双击式水轮机则多用于小型水电站。

(2) 反击式水轮机。水流能量以压能和动能两种形式在转轮流道内被转换为旋转机械能，转轮全部浸没在水中。反击式水轮机根据水流进入转轮轴面的流线方向不同，分为混流式水轮机、斜流式水轮机、轴流式水轮机和贯流式水轮机。反击式水轮机一般用于700m以下水头的水电站，是应用最广泛的一种水轮机。

特性　水轮机的水力性能随运行工况不同而有变化。表示水轮机在各种工况下的流量、输出功率、转速和效率的性能称为能量特性；反映在各种工况下空化（过去称作气蚀）发展程度的性能称为空化特性，用空化系数（过去称作气蚀系数）来表达；表现作用在转轮叶片和导叶上的水压力以及水力矩的特性称为力特性；当水轮机甩去全负荷，而导水机构又失去控制，水流能量使机组转速上升到某一稳定转速的特性称为飞逸特性；水流流经水轮机转轮和过流部件引起的水压脉动幅值及其频率是评价水轮机运行稳定性的重要指标，称为稳定特性。这些特性是判断水轮机技术水平和安全运行的指标，一般通过水轮机模型试验取得。随着现代计算机技术的发展，水轮机特性中的某些指标，如能量特性、力特性指标，也可通过计算流体动力学（computational fluid dynamics，CFD）仿真计算初步求得。

主要结构　反击式水轮机的主要部件有蜗壳（贯流式水轮机中称进口流道）、座环、导水机构、转轮、主轴、导轴承及尾水管等，见图1。

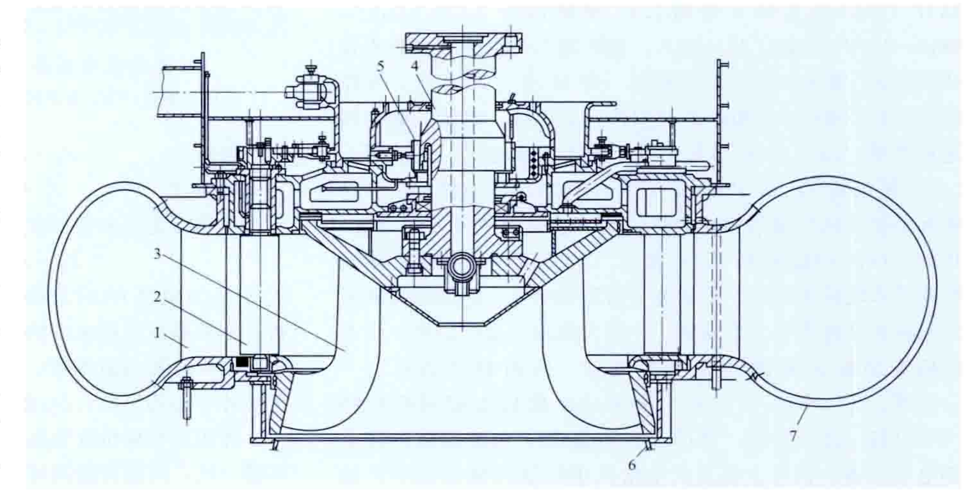


图1　反击式（混流式）水轮机结构图

1—座环；2—活动导叶；3—转轮；4—主轴；5—导轴承；6—尾水管；7—蜗壳

冲击式水轮机的主要部件由分流管、导水机构、转轮、主轴、导轴承和机壳等组成，导水机构主要包括喷嘴、喷针和折向器，见图2。喷针是调节或关闭喷嘴开口的部件，用来调节流量，从而调节机组输出功率。折向器位于喷嘴与转轮之间，

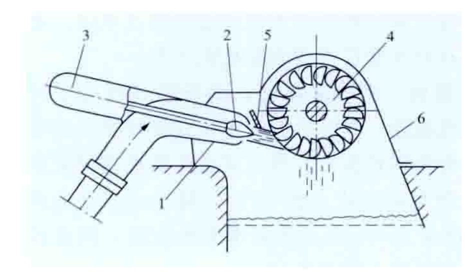


图 2 冲击式水轮机示意图
1—喷嘴；2—喷针；3—喷针操作机构；
4—转轮；5—折向器；6—机壳

在机组紧急关闭时用来快速遮断射流，然后再慢速关闭喷针，以防止压力钢管压力上升率过高。转轮由水斗和固定水斗的圆盘组成。水斗、喷嘴、喷针是决定冲击式水轮机运行效率和性能的关键部件。转轮在空气中工作，机壳保证转轮出水流畅，使射流处于大气压力下。机壳还用来支撑水轮机轴承。主轴是用于传递转轮的旋转力矩到发电机转子，以及水轮机转动部分轴向力到机组基础的部件。导轴承保证各转动部分与固定部分之间有适宜的间隙。

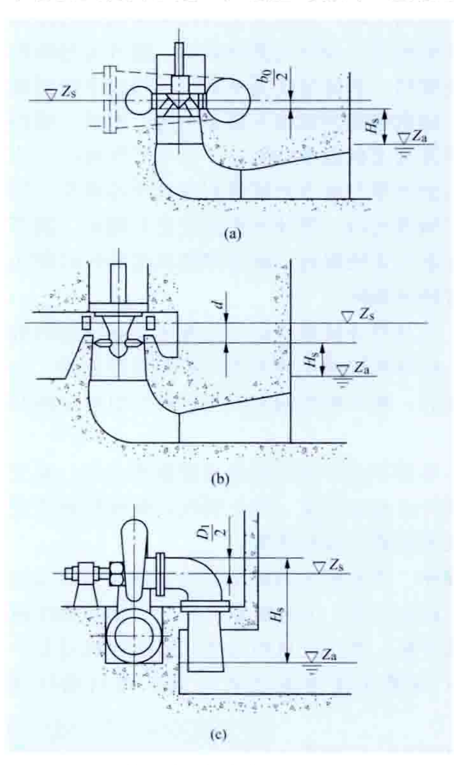
简史 水轮机的雏形是水车（水轮），这种水车在公元前已开始应用，将水流引入水车的勺斗中，使水车转动做功。中国在公元前 11 世纪即已出现水碓，“石碨作水碓，利于踏碓百倍”，晋代已发展到“有人作水轮，轮轴长可数尺”；古代希腊和印度在公元前 2 世纪已有水轮磨坊的记载，当时的水车主要用于提水和为简单加工提供动力。17～18 世纪应用在纺织厂的水轮直径已达到 9.15m，功率达 450hp（1hp=745.70W）。

18～19 世纪初，随着现代工业以及科学技术的发展，出现了第一批水轮机，1745 年英国人 A. 贝克（A. Barker）按反作用力的原理提出了反击式水轮机的设想，1751～1755 年瑞士人 L. 欧拉（L. Euler，1707－1783）在分析贝克水轮机工作原理的基础上，提出了反击式水轮机基本理论，1826 年法国人 B. 富尔内龙（B. Fournegron，曾译富聂隆，1802－1867）第一次命名这种水力原动机为水轮机，并于 1827～1834 年制造出了第一台功率为 6hp 的反击式离心水轮机；1847～1849 年美国工程师 J. B. 弗朗西斯（J. B. Francis，1815－1892）完成了径向流入、轴向流出的混流式水轮机设计与制造，称为弗朗西斯水轮机。到 19 世纪 50 年代，水轮机已具有了现代水轮机的各种部件，如导叶、转轮、蜗壳和尾水管等。19 世纪 80 年代出现了冲击式水轮机，是美国人 L. A. 佩尔顿（L. A. Pelton，1829－1908）首先提出的，这种水轮机又称为佩尔顿水轮机。由于平原河流开发的需要，1912～1916 年捷克人 V. 卡普兰（V. Kaplan）发展了轴流转桨式水轮机的设计，并创造了肘形尾水管，因此轴流转桨式水轮机又称卡普兰水轮机。中国大陆用于发电的第一台水轮机安装在云南的石龙坝水电站，电站最初装机 2×240kW，1912 年 4 月发电。该电站水轮机由德国福依特（VOITH）公司制造，西门子公司提供了水轮发电机和全部电气设备。世界上混流式水轮机单机最大输出功率已达 812MW，额定输出功率 761MW（中国向家坝水电站），转桨式水轮机机组最大额定功率为 230MW（俄罗斯舒尔宾水电站），水斗式水轮机机组最大额定功率为 420MW（瑞士 Bieudron 水电站），斜流式水轮机机组最大额定功率为 215MW，灯泡贯流式水轮机最大额定功率为 75.0MW（巴西杰瑞水电站，中国东方电机有限公司是生产制造商之一）。中国已投入运行了一批额定容量为 700MW 级的大型混流式水轮机，分布在三峡、龙滩、拉西瓦、小湾、溪洛渡等水电站；中国转桨式水轮机最大额定输出功率为 204MW（水口水电站），葛洲坝水电站两种转桨式水轮机的额定输出功率分别为 177.7MW 和 129MW，其水轮机转轮公称直径分别为 11.3m 和 10.2m；中国最大的灯泡贯流式水轮机额定输出功率为 58.5MW（桥巩水电站）。

shuilunji anzhuang gaocheng

水轮机安装高程

（setting elevation of turbine） 为防止水轮机空蚀而确定的水轮机基准线的设置高程（见图）。水轮机安装高程是一控制性的标高，直接影响水轮机空蚀性能和决定主机间的基础开挖高程。大中型水电站水轮机安装高程应根据机组的运行条件，经技术经济比较后确定。



水轮机安装高程示意图
（a）混流式；（b）轴流式；（c）横轴反击式

水轮机安装高程，对于立轴反击式水轮机，为导叶中心线高程；对于立轴冲击式水轮机，为喷嘴中心线高程；对于横轴水轮机，为主轴中心高程。

立轴反击式水轮机安装高程 Z_s 表达式如下：

混流式 $Z_s=Z_a+H_s+b_0/2$

轴流式 $Z_s=Z_a+H_s+d$

横轴反击式水轮机安装高程 Z_s 表达式如下

$$Z_s=Z_a+H_s-D_1/2$$

式中 Z_a 为确定 H_s 时采用的尾水位；H_s 为水轮机吸出高度，指空化基准面至尾水位的高程差，高于尾水位时取正值，低于尾水位时取负值海拔；b_0 为导叶高度；d 为叶片转动中心至导叶中心的高差；D_1 为转轮直径。

冲击式水轮机安装高程，一般应使得水斗最低点高于尾水槽（坑）内设计最高尾水位，并留一定的安全裕度，保证转轮处于大气中运行。

shuilunjiceng

水轮机层

（turbine floor） 水轮机蜗壳顶板至发电机层楼板之间的楼层。立轴机组的水轮机层中部为机组和机墩，周围布置有发电机引出母线、中性点、油水气管道及电缆等。当发电机支承结构为矮机墩时，发电机定子、转子、

下机架都落在水轮机层内。

水轮机层地面上常设有电缆沟、管道沟，一般加有盖板，以方便交通。

水轮机层的高度与水轮发电机组尺寸和布置有关，一般要满足发电机引出母线及其他配套设备布置需要，以及人行交通和设备搬运的需要。大型机组从水轮机层地面至发电机层之间高度较大，有的增加中间层。

横轴机组的水轮机和发电机装置在同一层，下面为水轮机的泄水结构。灯泡贯流式机组的发电机和水轮机都装置在下部过水管道内。

shuilunji daozhoucheng

水轮机导轴承 (guide bearing of water turbine)

承受由水轮机主轴传来的径向力和振动力，保持转轮和主轴绕旋转中心转动的部件。水轮机导轴承主要分为水润滑橡胶导轴承和稀油润滑导轴承两大类，轴承需要冷却和润滑。容量较小的卧式机组也有采用滚动轴承的。

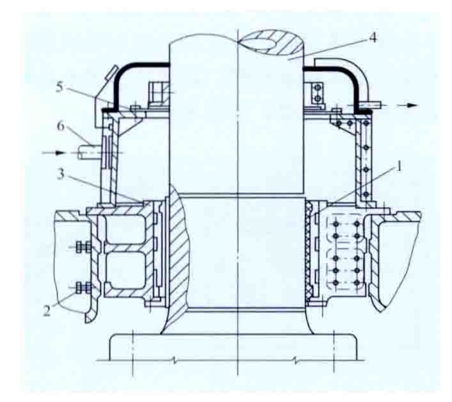


图 1 水润滑橡胶导轴承

1—橡胶轴瓦；2—支顶螺栓；3—不锈钢轴衬；4—主轴；5—橡胶平板密封；6—进水管

水润滑橡胶导轴承 如图 1 所示，其轴瓦是橡胶的，用水作为润滑剂。整个轴承用螺栓固定在顶盖上。橡胶轴瓦内表面开有许多纵向槽，使水进入轴瓦和轴颈之间起润滑和冷却作用。用轴瓦背面的支顶螺栓调整轴瓦和轴颈的间隙。轴颈包焊不锈钢轴衬防止主轴锈蚀。润滑水水压为 0.15～0.2MPa。这种轴承结构简单，安装方便，质量小，不怕水淹，工作可靠，密封在轴承上部，便于维护检修。如果水中含有泥沙，则容易磨损轴颈和轴瓦，瓦隙易变，刚性和稳定性不如油轴承。润滑水的含沙量及其悬浮物质不应超过 0.1g/L。橡胶瓦钢衬用钢板制造，滑动面采用中硬度耐磨橡胶，并且有耐酸碱性。

稀油润滑导轴承 用透平油润滑，滑动面浇注锡基轴承巴氏合金，分为筒式导轴承和分块瓦导轴承两种。

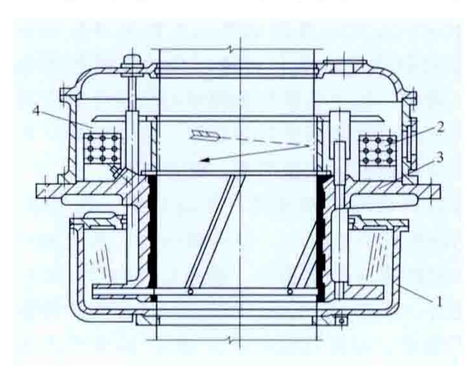


图 2 稀油润滑筒式导轴承

1—旋转油盆；2—冷却器；3—轴承体；4—上部油箱

(1) 筒式导轴承。见图 2，轴承体由 2～4 瓣组成，下部有一旋转油盆，利用油盆旋转产生的油压进行润滑。筒式导轴承的油冷却方式有两种：一种是安装冷却器，冷却器设在上部油箱；另一种是将冷却水通入瓦背，直接在瓦背冷却。这种轴承结构简单，平面布置紧凑，运行可靠，刚性好，但主轴密封在旋转油盆下面，检修维护不便。

(2) 分块瓦导轴承。见图 3，由 8～12 块轴瓦组成。其轴颈、轴瓦、轴承体都浸在油内。轴颈可与主轴锻成一体，也可将轴颈焊在轴上，当主轴不带法兰时轴颈可热套在轴上。分块瓦轴承外形尺寸较大，适用于轴颈超过 1m 的轴承。运行中轴承受力均匀，有自调能力，安装方便，但刚性稍差，轴承下部装有主轴密封，检修维护不便。

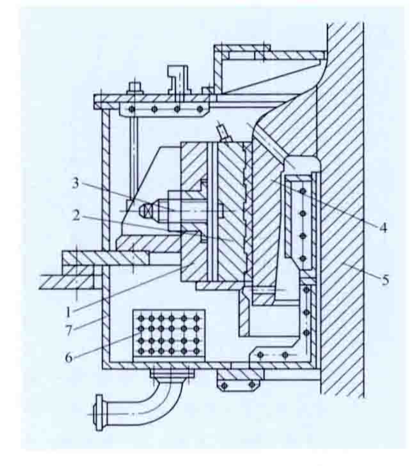


图 3 稀油润滑分块瓦导轴承

1—轴承体；2—轴瓦；3—支顶螺栓；4—轴颈；5—主轴；6—冷却器；7—油箱

shuilunji jingpingheng

水轮机静平衡 (static balance of water turbine)

为消除因转轮制造、安装误差等因素引起的水轮机转轮质量不平衡而进行的平衡试验、质量配重工作。转轮质量不平衡可引起机组运行不稳定，特别是在高转速下，影响更大。为消除质量不平衡，要求转轮在出厂前，或者在工地组焊的分瓣转轮，以及经过大量补焊处理可能造成质量不平衡的转轮都要进行静平衡试验。

水轮机静平衡分为立式静平衡和卧式静平衡，卧式静平衡较少采用。立式静平衡主要包括静平衡装置安装、静平衡装置灵敏度调整、静平衡配重及平衡品质检查工作。

转轮静平衡条件 与转轮高度 h 和转轮公称直径 D_1 的比值 h/D_1 及飞逸转速有关。对 $h/D_1<1$ 的转轮，在飞逸转速较低的情况下，一般只进行静平衡试验。

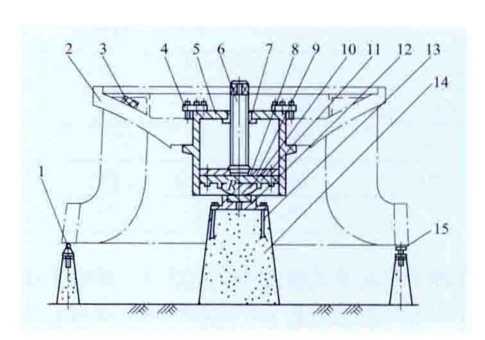


图 1 混流式水轮机转轮静平衡试验装置示意图

1—测量用千分表；2—转轮；3—配重块；4—压板；5—平衡托架；6—调整螺杆；7—螺杆套；8—定心板；9—平衡板；10—平衡球；11—平衡底板；12—平衡底板座；13—基础螺栓；14—混凝土墩；15—千斤顶

立式静平衡装置 立式混流式水轮机转轮静平衡试验装置见图 1，轴流式水轮机转轮静平衡试验装置见图 2。

静平衡装置灵敏度 表征静平衡试验的精度，可用转轮重心与平衡球中心间的距离 h 表示，见图 3。灵敏

度 h 按式（1）计算

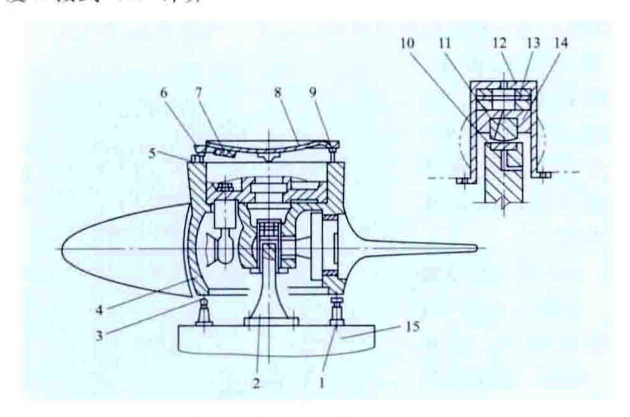


图 2　轴流式水轮机转轮静平衡试验装置示意图

1—千斤顶；2—支墩；3—测量用千分表；4—转轮；5—方形水平仪；6—下端盖；7—配重块；8—精平衡时所加配重块；9—组合螺钉；10—平衡底板；11—平衡球；12—平衡托架；13—垫环；14—定心板；15—平台

$$h=\frac{(PR-\mu m)R}{mH} \tag{1}$$

式中 h 为被平衡转轮重心与平衡球中心间的距离，mm；P 为转轮下环或转轮体下端面处所加试重的质量，kg；R 为转轮下环或转轮体下端面下沉量的测点与转轮旋转轴线的距离，mm；μ 为滚动摩擦系数，可通过用砝码两次配重带入式（1）计算得出；m 为被平衡转轮的质量，kg；H 为转轮下环或转轮体下端面的下沉量，mm。

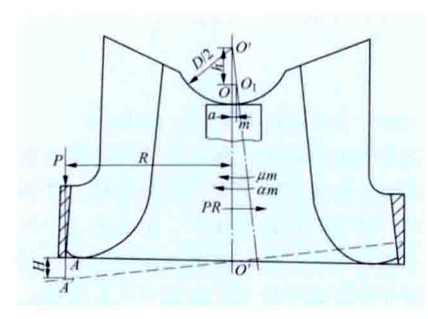


图 3　静平衡装置灵敏度示意图

为保证试验精度，灵敏度 h 值应在下表范围内查取。

灵敏度 h 值

转轮质量 m（kg）	最大距离（mm）	最小距离（mm）
$m<5000$	40	20
$5000\leqslant m<10\,000$	50	30
$10\,000\leqslant m<50\,000$	60	40
$50\,000\leqslant m<100\,000$	80	50
$100\,000\leqslant m<200\,000$	100	70
$m\geqslant 200\,000$	120	90

平衡配重　在静平衡装置灵敏度符合要求后，进行平衡配重。用千分表或水平仪测量转轮下环或转轮体下端面最高点与最低点之差，按式（2）计算所需配重质量

$$P'=\frac{m(\Delta H_1 h/2+\mu R)}{R^2} \tag{2}$$

式中 P' 为使转轮下环或转轮体下端面水平时所需配重的质量，kg；ΔH_1 为转轮下环或转轮体下端面测量最高点与最低点实际测量值之差，mm。

平衡品质检查　计算转轮允许下沉值 H_0

$$H_0=\frac{(40-\mu n_p)R}{n_p h} \tag{3}$$

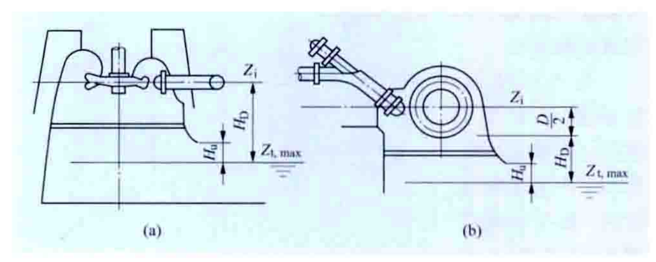
式中 n_p 为水轮机最大飞逸转速，r/min。

用千分表或水平仪测量转轮下环或转轮体端面最高点与最低点的差值并计算转轮下沉值（$\Delta H_1/2$），若转轮下沉值不大于 H_0，则认为静平衡合格。

shuilunji paichu gaodu

水轮机排出高度　（drain height of turbine）　冲击式水轮机转轮中心（卧式机组为节圆最低点）相对于下游水面的高度，用 H_D 表示，单位为 m。自针阀喷出的高速射流经水斗做功排出时会溅起尾水干扰转轮运行，使效率、功率下降。根据实验统计，将水斗中心置于下游水面以上（1～1.5）D 处可免除此影响，即 $H_D=$（1～1.5）D，式中 D 为转轮公称直径。H_D 对立式机组取大值，对卧式机组取小值。

为了保证水轮机长期安全运行，要根据排出高度来确定水轮机安装高程。立式冲击式水轮机的安装高程起算点为转轮水斗的水平中心线，卧式冲击式水轮机的安装高程起算点则为主轴中心线，如图所示。



冲击式水轮机安装高程示意图

(a) 立式冲击式水轮机，$Z_i=Z_{t,max}+H_D$；

(b) 卧式冲击式水轮机，$Z_i=Z_{t,max}+H_D+D/2$

$Z_{t,max}$—最高下游水面高程；Z_i—水轮机安装高程

在满足排出高度的同时，在水工建筑物与下游水面之间还应留有不小于 400mm 的通气高度，如图中 H_0 所示，这样可避免尾水渠出流不畅或增减负荷时产生涌浪和回流而导致机组振动、功率摆动或下降。

shuilunji tiaosuqi

水轮机调速器　（speed governor of turbine）　实现水轮机调节及相应控制的机构和指示仪表等装置的总称。调速器通过改变水轮机导叶开度控制进入水轮机转轮的流量，进而调节水轮机的输出功率和转速，并实现机组的起动、停机、发电、调相、甩负荷处理等操作控制及各种工况间的自动转换。对水轮机调速器总的要求是：稳定性好，可靠性高，静、动态品质优良，操作简单，维护方便。

早期的调速器是机械液压调速器，简称机调。其测速、稳定及反馈信号均用机械方法产生，经机械综合后通过液压放大部分实现对水轮机接力器的驱动。机调在 20 世纪 30 年代时发展就较为完善，其静、动态特性较差，且存在机件磨损等问题，但操作简单、可靠性较高。20 世纪 40 年代出现了电气液压调速器（简称电液调速器、电调），其测速、稳定及反馈信号均用电气方法产生，经电气综合、放大后通过电气液压放大部分实现对水轮机接力器的驱动。电调在 20 世纪

50年代以来获得了迅速发展，并经历了从电子管、晶体管到集成电路等几个发展阶段。电调的性能品质相对机调有了一定的提高，在测量和控制精度、速动性及稳定性等方面均有较大改善，但可靠性没有明显提高。20世纪70年代，随着微机的出现与计算机应用技术的普及和发展，中国与国际同步开始研制基于微机的电液调速器（简称微机调速器）。到20世纪80年代中后期，微机调速器得到推广应用，其性能水平明显高于机调和电调，而且可以用计算机软件很方便地实现调节控制功能，可靠性、可用性、可维护性大大提高。大中型水电机组均采用微机调速器或已改造成微机调速器。对于一些中小型水电机组，特别是只带固定负荷的小型机组，仍采用机械液压调速器。

机械液压调速器　其结构简图见图1。飞摆由与水轮机同轴的永磁发电机供电的飞摆电动机驱动，是测速部件。水轮机转速偏离额定值时，飞摆旋转速度也随之变化。在飞摆重块离心力的作用下使得 P_0 点离开正常位置，C 点也随之偏离，并带动主配压阀的活塞移动，使压力油进入主接力器关闭或开启水轮机导叶，改变流入水轮机的水流流量，使水轮机的转速回到原来的给定转速。主配压阀和主接力器组成液压放大装置，用来放大信号的功率和幅值。缓冲器是暂态反馈元件，将主接力器行程信号以暂态负反馈的形式送到液压放大装置的输入端，以保证调节系统的稳定。永态反馈元件是将主接力器行程信号以永态负反馈的形式送到液压放大装置的输入端，使调节系统的静特性成为有差特性，从而使并列运行的机组间可以按有差特性进行负荷分配。转速调整机构由螺母、螺杆和操作机构组成，用来改变 R_0 和 C 的位置，从而打开或关闭导叶，人为地使机组的转速达到一个新的稳态值。

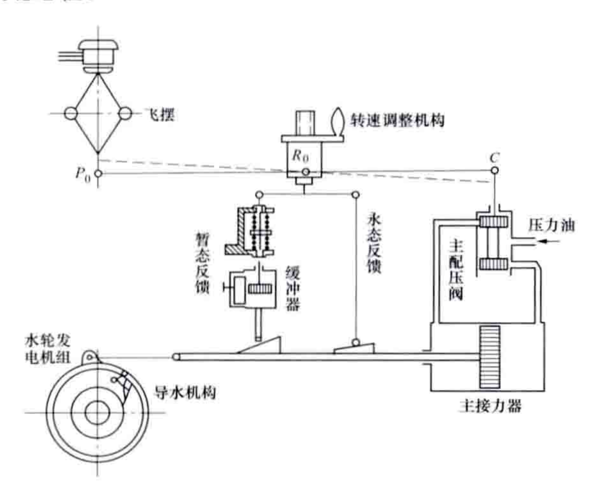


图1　机械液压调速器结构简图

电气液压调速器　其框图见图2。电气液压调速器的测频回路、放大回路、微分回路、调差回路、转速给定和功率给定单元均由电气回路构成。液压放大装置由引导阀、辅助接力器和主配压阀等机械部件构成。测频回路用来构成测速装置，微分回路用来构成暂态反馈，调差回路用来构成永态反馈。电液转换器将电气回路输出的电信号转换成机械位移信号，以驱动引导阀。位移传感器将接力器的位移转换成电信号，以便与其他电信号进行综合。电调较机调灵敏度高、转速死区小、速动性好，但相对于微机调速器来说，存在元器件可靠性不高、系统结构复杂、调整和维护不方便等许多不足。因此，电液调速器已被微机调速器取代。

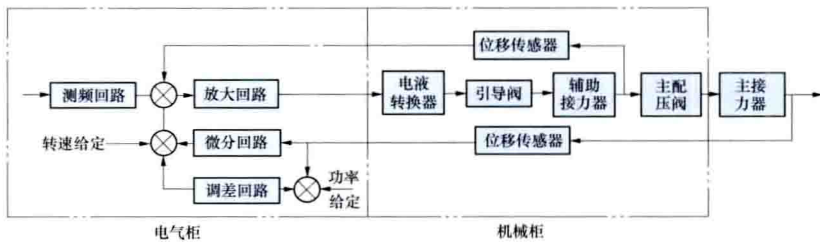


图2　电气液压调速器框图

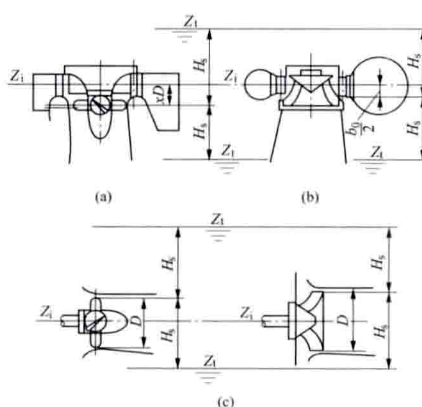
微机调速器　电液调速器的延伸与发展，在结构上与电液调速器的最大区别在于：调速器的信号检测和采集、调节规律的形成、各项功能的实现均由位于微机系统及其接口来完成，调速器的机械部分主要起电气随动和液压放大的作用。电气柜的硬件系统由工业微机系统、频率测量与I/O接口、信号综合和功率放大、人机接口及反馈传感器等几部分组成，软件系统则包括信号采集与测量软件、调节算法与控制软件、信号输出软件、故障诊断与容错处理软件及人机接口软件等。不同的微机调速器可能具有不同的系统结构，如单微机系统、双微机系统、多CPU系统、多微机容错系统等，它们决定着调速器不同的可靠性和性能水平。微机调速器的机械柜主要包括电/液转换（如电液转换器、伺服比例阀）或电/机转换（如步进电动机、伺服电动机）、液压放大部件、主配压阀，以及机械开限和手操机构等，不同的调速器产品在机械柜结构设计、元件选取、空间布置等方面也存在差异，它们决定着调速器的操作灵敏性、可靠性、使用和维护的便利性等。

shuilunji xichu gaodu

水轮机吸出高度 (suction head of turbine)

反击式水轮机转轮内压力最低点相对于下游水面的高度，用 H_s 表示，单位为m。

反击式水轮机转轮叶片背面接近出水边处的压力最低，是空化的早发区，为避免空化的不利影响，需选用适当的 H_s 来限制该处的真空值。然而，水轮机转轮内压力最低点的准确位置很难确定，实践中规定水轮机吸出高度为水轮机空化基准面与尾水位的高差。不同型式的水轮机空化



反击式水轮机安装高程示意图

(a) 立式轴流式水轮机，$Z_i=Z_t+H_s+xD$；
(b) 立式混流式水轮机，$Z_i=Z_t+H_s+\frac{b_0}{2}$；
(c) 卧式水轮机，$Z_i=Z_t+H_s-\frac{D}{2}$

Z_i—水轮机安装高程；Z_t—下游水面高程；x—系数（约为0.41）；D—转轮公称直径；b_0—导叶高度

基准面为：立轴混流式水轮机是导叶下端面（或底环上平面），立轴轴流式水轮机取转轮叶片旋转轴线所在的平面，立轴斜流式取转轮叶片旋转轴线与转轮室内表面交点的所在平面，卧式反击式水轮机是转轮叶片最高点所在的平面。吸出高度一般用下式计算

$$H_s \leqslant 10 - \frac{Z}{900} - K_a \sigma_m H_r$$

式中 Z 为电站厂房位置的地面海拔高程，m；K_a 为裕量系数；σ_m 为模型空化系数；H_r 为水轮机额定水头，m。

水轮机安装高程根据水轮机吸出高度确定。反击式水轮机安装高程（Z_t）是水轮机导叶中心线或轴线的海拔高程，计算及表示如上图所示。

shuilunji xiaolü shiyan

水轮机效率试验 (efficiency test of water turbine)

测量水轮机将水能转换为机械能过程中转换效率的试验。效率试验结果可用来检验模型和原型效率转换关系，检验合同的保证值，率定流量计的系数，确定转桨式水轮机的最优协联关系，检验水轮机检修的效果和质量等。

水轮机效率 η_t 的计算式为

$$\eta_t = \frac{P_g}{\rho g Q H \eta_g} \tag{1}$$

式中 P_g 为发电机输出功率，W；ρ 为水的密度，kg/m^3；g 为重力加速度，m/s^2；Q 为水轮机流量，m^3/s；H 为水轮机水头，m；η_g 为发电机效率（见水轮发电机效率试验），%。

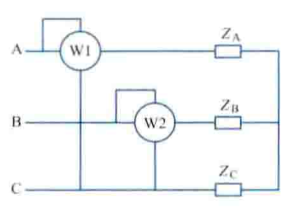


图 1　双瓦特表接线原理图

发电机输出功率测量　测量方法有双瓦特表法、三瓦特表法、功率传感器法 3 种。

双瓦特表法　用于三相三线制的大中型发电机，是最常用的方法。瓦特表接线原理见图 1。根据两表的读数 W_1、W_2 及其刻度常数 C，以及互感器的变比 K_I 和 K_V 可算出 P_g，即

$$P_g = C \frac{K_I K_V (\pm W_1 \pm W_2)}{1000(1 + \Delta K)} \tag{2}$$

式中 ΔK 为互感器的修正系数。

三瓦特表法　适用于三相四线制发电机，这种接线制只在小型发电机中采用。三瓦特表接线原理见图 2。功率用式(3) 计算，即

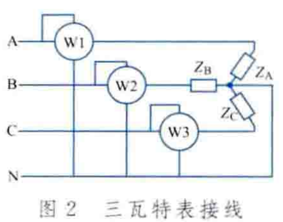


图 2　三瓦特表接线原理图

$$P_g = C K_I K_V (\pm W_1 \pm W_2 \pm W_3)/1000(1 + \Delta K) \tag{3}$$

功率传感器法　原理和前述两种方法相同，用于自动测量、显示和记录。

水轮机水头测量　水轮机的工作水头是指水轮机做功用的有效水头，为水轮进、出口断面的总单位能量差。其表达式为

$$H = \frac{p_1 - p_2}{\rho g} + \frac{\alpha_1 v_1^2 - \alpha_2 v_2^2}{2g} + (Z_1 - Z_2) \tag{4}$$

式中 p_1、p_2 为进、出口断面处水的表压力，Pa；α_1、α_2 为进、出口断面处的流速不均匀系数；v_1、v_2 为进、出口断面流速，m/s；Z_1、Z_2 为进、出口断面处压力表中心与测点的高程差，m；其余符号含义同式（1）。

水轮机的水头包含静水头（各 $\frac{p}{\rho g}$ 和 Z 项）和速度水头（各 $\frac{\alpha v^2}{2g}$ 项）两部分。水头的测量归结为压力、水位（高程）和流速的测量。压力用高精度压力表或压力传感器测量，水位用水位标尺或水位传感器测量，水流速度则根据流量测量结果计算。

水轮机流量测量　测量方法分为绝对法和相对法。绝对法有流速仪法、皮托管法、压力-时间法、示踪法、声学法及热力学法等。相对法有压差法、温特-肯尼迪法、非标准压差法及非标准堰板法等。流量测量是水轮机现场效率测试中最重要的环节，是测试中难度最大、工作量最多的一项工作，它对整个测试精度起着主要影响。

流速仪法　将一定数量的流速仪布置在流道内适当断面的特定测点处，同时测出各流速点的时均值，并对整个测流断面积分，从而得出流量。对于圆形断面，按式（5）积分即可算出流量

$$Q = \int_0^{2\pi} \int_0^R v(r,\theta) r \mathrm{d}r \mathrm{d}\theta \tag{5}$$

式中 R 为圆形断面的最大半径；r 为测点半径；v 为在极坐标测点上的流速；θ 为角度。流速仪的数量、布置方式与流道形状、尺寸及水流的稳定情况有关。在具有良好测量技术和流态的情况下，在 95% 置信度下，封闭管道中预估不确定度为 ±1%～±1.5%。

皮托管法　用皮托管测量动压和静压，计算出局部流速（点流速），在一个断面上分布有足够数量的皮托管测点，就可用流速面积法计算出流量。皮托管法只能用于流速较高、没有悬浮颗粒的封闭管道中。

图 3　压力-时间法水锤波示意图

压力-时间法　又称水锤法或吉普逊法。其原理是：当水轮机导叶快速关闭时，管道内的压力升高（水锤效应），在关闭过程中压力升高的数值和过程与水轮机的流量相关。图 3 为水锤波示意图。流量 Q 按式（6）计算，即

$$Q = \frac{Ag}{L} \int_{t1}^{t2} \frac{\Delta p}{\gamma_0} \mathrm{d}t + q_0 \tag{6}$$

式中 A 为管道断面积，m^2；g 为重力加速度，m/s^2；L 为选定的两测量断面间的距离，m；t_1、t_2 为导叶关闭起始、终了时刻，s；Δp 为压力变化值；γ_0 为水的重度，kN/m^3；q_0 为导叶漏水量，m^3/s。使用自动测量仪器时，Q 可根据测量结果自动求出。水锤法适用于封闭的引水管路，流量测量综合不确定度可达到±1%。

示踪法　有均匀注入法、积分法（突然注入法）和传输-时间法 3 种。示踪剂多用食盐，前两种采用稀释原理，称盐水浓度法；后一种是以测量示踪剂通过管路两已知距离断面的时间确定流速，称盐水速度法。

盐水浓度法的原理可用以下方程表示

$$C_0 Q + C_1 q = C_2 (Q + q) \tag{7}$$

式中 C_0、C_1、C_2 分别为原水流、注入的示踪剂溶液和取样断面混合溶液的浓度；Q、q 分别为待测流量和示踪剂溶液的流量。由于 $C_0 \leqslant C_2 \leqslant C_1$，因此式（7）可简化、转换为

$$Q = q\frac{C_1}{C_2} \tag{8}$$

因此，只要测得 q、C_1 和 C_2 3 个量，就可确定流量。这种方法的综合不确定度可达±1%～±2%。

盐水速度法的原理表达式为

$$Q = V/\bar{t} \tag{9}$$

式中 V 为两测量断面水流的容积；$\bar{t}$ 为盐水通过两断面的平均时间。这种方法的综合不确定度可达±1%～±1.5%。

声学法　将声波（通常为超声波）的传播速度和水流速度进行矢量叠加，通过测算水流速度来计算流量。声学法分为时间差法、频率差法和多普勒法。其中时间差法精度高、干扰小、使用方便，应用最广。图 4 为超声波测流示意图。

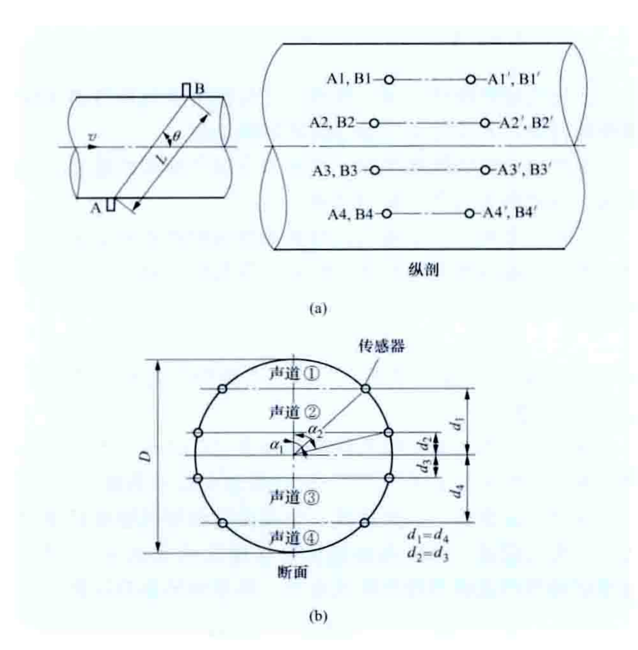


图 4　声学法测流示意图
(a) 原理示意图；(b) 传感器布置图
A、B—超声波换能器

如图 4 所示，当超声波换能器 A 发射、B 接收时，超声波传播时间为

$$T_1 = \frac{L}{C + v\cos\theta} \tag{10}$$

B 发射、A 接收时的传播时间为

$$T_2 = \frac{L}{C - v\cos\theta} \tag{11}$$

整理后得

$$v = \frac{C^2}{2L\cos\theta}\Delta T,\ \Delta T = T_2 - T_1$$

或

$$v = \frac{L}{2\cos\theta}\left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}\right) \tag{12}$$

这就是时差法测量流速的基本关系式。

声学法可用于有压管道和开敞的渠道，要求有一定的直线段；可用于清水或浑水，但浑水中泥沙含量有一定限制。声学法还未被国际电工委员会（International Electrotechnical Commission，IEC）正式推荐。

热力学法　水流通过水轮机流道时产生的水力损失都转化为热能并加热了水流，使水轮机进、出口断面水流产生温差。热力学法通过测量该温差实现水轮机效率的测定，然后根据效率、水力比能和功率计算出流量，是一种间接测量法。热力学法适用于高水头的水轮机，英国标准 BS 5860—1980《水轮机、蓄水泵及涡轮泵的效率测定方法（热力学法）》对热力学法有具体建议和规定，效率综合不确定度可达到±1.5%。

压差法　弯形流道内侧和外侧的压差 Δh 和流量之间有 $Q = K\Delta h^n$ 的关系，测量的是流量相对值，可通过原位绝对法率定式中常系数 K 和 n 后计算流量绝对值。水轮机的测点均选在蜗壳进口断面下游与该断面成 45°角的断面上，这种方法用于水轮机效率的在线监测比较简便。

效率换算　机组的动力特性均是对某一固定水头而言的，然而在试验过程中，由于上、下游水位的变化，相应各工况的试验水头是不同的，为得到某一计算水头 H_p 下的机组效率性能指标，需将试验实测数据换算到同一计算水头。水头选取的原则是，使半数以上试验工况的实测水头 H_i 和计算水头 H_p 之差在±2%以内。实测值的换算公式为

$$P_p = P_i\left(\frac{H_p}{H_i}\right)^{3/2} \tag{13}$$

$$Q_p = Q_i\left(\frac{H_p}{H_i}\right)^{1/2} \tag{14}$$

式中下标 i 表示实测值；p 表示换算值。机组效率用式（15）计算

$$\eta_p = \frac{P_p}{g\rho Q_p H} \times 100\% \tag{15}$$

各计算水头下的水轮机效率可由式（15）计算得到。

通过效率试验可获得功率特性曲线、流量特性曲线和导叶开度特性曲线，如图 5 所示。图中 q、P_g、ΔH 和 α 分别为耗水率、发电机输出功率、引水系统水头损失和导叶开度。

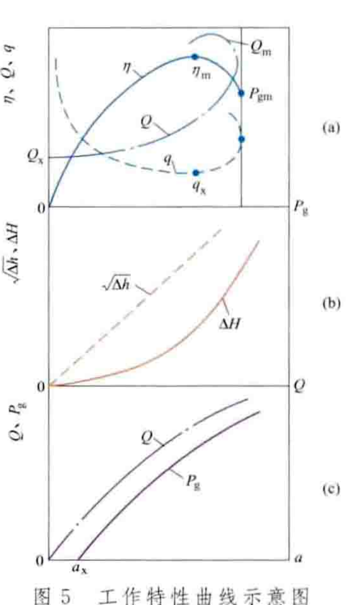


图 5　工作特性曲线示意图
(a) 功率特性曲线，η、Q、$q = f(P_g)$；
(b) 流量特性曲线，$\sqrt{\Delta h}$、$\Delta H = f(Q)$；
(c) 导叶开度特性曲线，Q、$P_g = f(\alpha)$

shuilunji yali maidong

水轮机压力脉动 (pressure fluctuation of water turbine)

水轮机流道中水流压力围绕其平均值作周期性或随机性交替变化的一种现象。水轮机压力脉动是引起水轮发电机组振动的主要原因之一。

主要类型　水轮机压力脉动主要由尾水管涡带、卡门涡街、叶栅绕流、叶片进口边脱流、导叶出水边脱流、止漏环间隙不均和水体共振等因素引发，通常使用压力传感器进行测量。

尾水管涡带引起的压力脉动　水轮机在低负荷工况运行

时，因尾水管内螺旋状涡带的旋转在管壁上产生的周期性压力脉动。一般情况下，最大压力脉动值出现在40%～50%负荷左右，基波频率约为机组转速频率的1/3。

卡门涡街引起的压力脉动　因流体绕流导叶或转轮叶片出现卡门涡街而产生的压力脉动，表现为流体在绕流物体后面形成交替出现、旋转方向相反的两列漩涡，漩涡在绕流体两侧分离时，就会有相同频率的力作用在绕流体上，产生压力脉动。压力脉动的幅值一般较小，但当其频率和绕流体或周围水体的固有频率相同或相近时就会引起共振。频率计算公式

$$f_K = Sr\frac{v}{d}\quad (\mathrm{Hz})$$

式中 Sr 为斯特劳哈尔数，可取0.23；v 为卡门涡街分离点处的相对速度，m/s；d 为卡门涡街分离点处的叶片厚度，m。

转轮叶栅绕流引起的水压脉动　由叶道断面上水流速度和压力分布不均引起的基波频率等于转速频率乘以叶片数的压力脉动。

转轮叶片进口水流冲击和脱流引起的随机压力脉动　当进入叶片的水流冲角（正或负）较大时，在叶片上产生频率不定的压力脉动。导叶开度较小时比较厉害，是机组起动、空转和小开度运行时振动、噪声较强的主要原因。

导叶后压力脉动　机组在低负荷运行时，导叶后出现脱流，产生有旋涡，造成导叶出口各间隔压力分布不均匀，使转轮叶片进口受到基波频率为转速频率乘以叶片数的压力脉动。

止漏环间隙压力脉动　因活动止漏环不圆或偏心造成止漏环在圆周上的径向间隙不均匀而引起的压力脉动，频率为转速频率，可引起强烈的弓状回旋。

引水管路水体共振引起的振动　引水管路水体固有频率和机组转速频率或其倍频相同或相近的条件下激发的共振。

压力脉动的测量　压力脉动用压力传感器和相应的仪器测量，压力传感器主要有应变式、压阻式、压电式等类型。传感器的灵敏度应与被测压力脉动幅值的大小相适应，工作压力应高于流道测点处的最高压力，线性频率范围应满足最高测量频率的需要。

压力脉动测点的位置和数量取决于测量目的和现场条件，一般应选在压力脉动最大的地方。

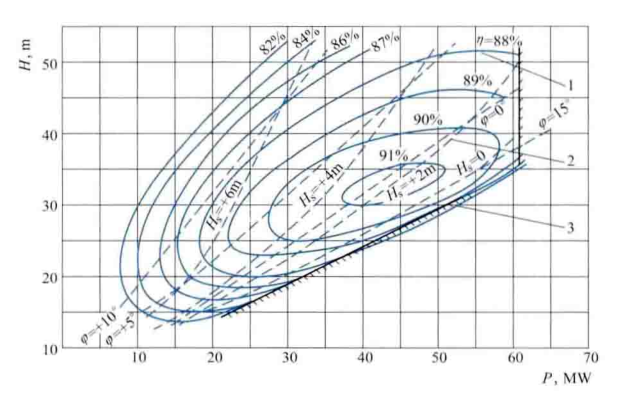
水电工程中压力脉动幅值习惯上用峰-峰值。压力脉动幅值一般都不是标准的正弦波，数据分析时，同一频率下可有两种不同的幅值，即基波值和通频值（基波和谐波的矢量和）。两者间有较大的差异，如需对它们进行评价，需注意其取值方法应和评价标准或合同规定的方法相一致。

减轻压力脉动的措施　一般情况下，采用向流道内补入空气的方式可以有效地降低尾水管涡带压力脉动。对于中小型机组，也可在尾水管内安装不同形式的结构物；对叶片尾部进行修型，改变其固有频率可避免因卡门涡街引发的共振；减小止漏环转动部分的不圆度，减小轴线偏差，适当减小轴承间隙等可减轻止漏环压力脉动。

shuilunji yunzhuan texing quxian

水轮机运转特性曲线

(performance curve of water turbine)　反映水轮机在各水头和功率下的效率、空化等性能的曲线。在以水轮机水头和输出功率（或流量）为纵、横坐标的坐标系内，绘制额定转速下的等效率曲线、等吸出高度线及功率限制线等，表示原型水轮机的性能，如图所示。



水轮机运转特性曲线（轴流转桨式）

1—等效率曲线；2—等吸出高度线；3—功率限制线

水轮机运转特性曲线一般由水轮机模型综合特性曲线数据换算而来，必要时也可通过真机试验绘制。

水轮机运转特性曲线用于指导水电站合理安排机组运行区域，以提高水力资源利用效果。

等效率曲线　一组曲线，每条曲线由相同效率的运行工况点组成，效率数值由模型试验效率值及修正值计算。具体表达式为

$$\eta_p = \eta_m + \Delta\eta$$

式中 η_p 为原型水轮机效率，%；η_m 为模型水轮机效率，%；$\Delta\eta$ 为效率修正值，%。

反击式、冲击式水轮机效率修正值 $\Delta\eta$ 由不同的公式计算，参见GB/T 15468—2006《水轮机基本技术条件》。

等吸出高度线　一组曲线，每条曲线由相同吸出高度的运行工况点组成，吸出高度数值可根据空化系数 σ_m（可由模型试验测得或模型特性曲线查得）和电站的参数计算

$$H_s = 10 - \frac{\nabla}{900} - K_1\sigma_m H$$

式中 ∇ 为尾水位海拔高程，m；K_1 为空化安全系数，一般取1.2～1.5；σ_m 为模型水轮机空化系数；H 为水头，m。

功率限制线　由竖直线和斜线两部分组成，在最小水头 H_{min} 至额定水头 H_r 段，因水轮机功率限制或导叶、轮叶最大开度限制、空化等因素，水轮机在某一水头下对应的最大出力点的连线，组成出力限制线的斜线部分；在额定水头 H_r 至最大水头 H_{max} 段，水轮机功率因受发电机的额定功率限制，功率限制线为一垂直于横坐标轴的竖直线段。

水轮机功率 P 可由下式计算

$$P = \rho g Q H \eta$$

式中 P 为水轮机功率，W；ρ 为水的密度，kg/m³；g 为重力加速度，m/s²；Q 为水轮机的流量，m³/s；H 为水头，m；η 为水轮机效率，%。

shuilunji zhuzhou

水轮机主轴

(main shaft of water turbine)　连接水轮机与水轮发电机，将转轮产生的旋转机械能和轴向力传递给发电机的部件。一般水轮机主轴制成整段（见图1），

一端与水轮机转轮连接，另一端与发电机轴或转子体连接。有时为了确保在不拆发电机的情况下能拆出水轮机转轮，将水轮机主轴分成两段。横轴冲击式水轮机的发电机轴直接与转轮连接，无水轮机主轴。



图1　三峡水电站水轮机主轴加工

连接方式　主轴与水轮机转轮及发电机轴的连接依靠刚性法兰，一般采用销子联轴螺栓紧固（见图2），结构简单、可靠，但互换性差，加工较麻烦。也有用销和键传动的，免去了联轴螺栓孔的铰孔工序，经少量修整即可互换。而采用高强度联轴螺栓连接，靠摩擦传递扭矩，结构简单、加工容易、互换性好。



图2　三峡水电站水轮机主轴吊装

结构　大中型水轮机主轴一般采用空心结构。混流式水轮机常利用中心孔补气，转桨式水轮机桨叶操作油管装于中心孔内。主轴满足扭转振动和横向振动的要求，其轴系临界转速应等于水轮机最大飞逸转速的1.1～1.25倍。

shuineng jingji

水能经济　(hydropower economy)

研究水能开发、转换、传输和分配中经济分析与评价的理论和方法。其目的在于经济合理地利用水能。水力发电是现代水能开发的普遍形式，因而水能经济的主要内容就是分析研究水电站规划、设计和运行管理过程中的费用和效益（见水电站效益），以寻求综合经济效益最优的方案。一般情况下，先拟定若干满足要求、技术上可行的方案，在费用、效益分析的基础上，对各方案进行技术经济比较，经综合分析后决策。比较严格的做法是根据现代数学的规划理论，构造模型，应用优化的方法，在满足约束条件的前提下，寻找到单目标或多目标的最优方案（见水能利用优化）。在水能经济研究中，要充分注意水能开发利用的特点和研究内容。

特点　主要体现在3个方面：

(1) 水力发电同时承担一次能源开发和二次能源转换的双重任务。煤电、油电、核电与水电进行项目技术经济分析和评价时，方案费用的计算应包括一次能源和二次能源开发、转换、传输和消费各环节的费用，尤其不能忽略环境保护的费用。水电站建成后不需要消耗燃料，生产成本低。（见水电站发电成本）

(2) 水电站的水库常具有防洪、灌溉、航运、供水、养殖和旅游等综合利用效益。对于有综合利用效益的水电站，在经济评价中要计及其效益，或进行费用的合理分摊。（见综合利用工程费用分摊）

(3) 在水电站生产运行过程中，通过其上游或下游梯级电站的投产，或通过跨流域电力补偿调节、电力系统优化调度等，增加水电站群的保证出力和年发电量。由于大型水电站的投入，为电力系统带来了联网的错峰与减少备用容量的效益。在进行经济评价时，应计及上述为电力系统所增加的效益及相应增加的输电费用。（见水库群补偿径流调节）

研究内容　包括政策研究、宏观规划、水电站项目经济研究和水电站经济运行4个方面。

(1) 政策研究。属于宏观决策性质，如水电建设和管理体制、财税政策、电价、建设资金筹集和使用等。

(2) 宏观规划。从能源开发、电力建设和水资源开发利用的总体上研究水电在电力系统中的合理比重，以及水能开发的合理布局和水电站的建设时序。具体内容包括国民经济发展对能源和电力的需求预测、电力发展规划和目标电价预测、水电比重较大的电力系统发展规划（含电力系统电源结构优化、水电站和火电厂合理的开发时序及水电站合理供电范围）、河流综合利用规划、水电开发方式及梯级开发规划和地区水电发展规划。

(3) 水电站项目经济研究。含建设项目经济评价、市场空间和竞争力分析、水电站特征值（如水位、装机容量及机组机型等）优选和其他有关项目的经济研究。在水能经济研究中，常用“有和无”对比的方法进行建设项目的经济评价，即在同等满足系统供电数量、质量和可靠性的条件下，按兴建和不兴建某一建设项目两种情况进行比较，以全系统总费用现值最小确定兴建该项目的合理性。

(4) 水电站经济运行。包括水电站、火电厂在电力系统中的最优运行方式和水电站水库（群）优化调度等。

经济评价　包括国民经济评价（也称经济分析）和财务评价（也称财务分析）两大内容；另外，在水电规划设计中，还包括应用比较广泛的方案经济比较及综合评价等内容。（见水电站国民经济评价和水电站财务评价）

中国水能资源丰富，但开发利用程度远低于发达国家，在今后水电站建设中，水能经济有大量课题需要深入研究，主要是：①按照中国可持续发展战略，从节约资源和优化能源结构方面，提出水能经济新的分析理论、评价准则和方法。②结合市场经济发展、电力工业改革和建立发电市场的进程，提出在经济评价中正确体现水电站效益特点，照顾国家、地方、企业和集体各方面的利益的原则和方法。③水电建设资金筹集、电价政策、金融和财税政策、水库经济和水电建设管理体制等。

shuinengliyongxue

水能利用学　(science of hydropower utilization)

研究经济合理地开发和利用水体的势能和动能发电的学科。又称水能学。它是一门技术与经济相结合的边缘学科。

其基础是水文学、水力发电工程学、动能经济学、水利工程学、工程经济学和系统工程学等，并与水资源、电力和能源的开发、电力系统、社会科学及生态环境学等方面有紧密的联系。

主要研究问题　包括水资源系统、一次能源系统及电力系统中与水能的合理利用有关的，从宏观到微观的一系列技术经济问题。主要有：水能资源普查，河流梯级开发和综合利用规划，地区（或跨地区）一次能源和电源规划，地区（或跨地区）水电发展规划，水电站项目经济可行性评价，电站主要特征值（如正常蓄水位、装机容量等）优选，大型水电站合理供电范围，水电站的运行、调度方案等。

主要内容　包括：①水能开发利用方式研究。②电力市场调查。③水库运行决策。利用水库进行径流调节，制订水库的运行方式，提高水能利用的数量和质量（见径流调节）。④水电站运行决策。研究水电站在电力系统中的任务和运行方式，进行电力系统的电力电量平衡，核定水电站的容量和电量效益（见电力电量平衡）。⑤水电站投资决策。当水电站效益的取得以增加投资为代价时，对不同方案进行经济比较（见水电站方案经济比较），作为方案选定的经济依据（见水能经济）。

基本原则　水能利用学研究要遵循的基本原则包括：

（1）以全系统（含电力系统的一次、二次能源系统和水资源系统）整体最优为出发点研究问题和选择方案。

（2）在不增加水电站资金投入的条件下，将系统中的水库群或水、火、风、核电站群等作为一个整体，研究水库群或电源总体和各自的优化运行方式，使系统发电经济效益达到最大。

（3）在进行投资决策时，投资效益除本电站的效益外，还要计及由于该资金投入带来的系统附加效益，如增加水电站群的保证出力和年发电量等“群”的增益。应考虑水电站在整个服务期中效益和费用随时间推移而引起的变化。

（4）在进行综合利用项目的投资决策时，需要考虑综合利用的效益，或进行综合利用工程费用分摊。

研究方法　分为方案对比法和模型优化法两类。

（1）方案对比法。常用的方法，即根据工程经验列举若干个可相互替代的方案，并对每一个方案进行运行决策，相应核定水电站（群）的发电效益，以各方案满足相同数量、质量的电力和电量需求为前提，确定逐年系统内其他电站的规模及相应燃料消耗量，据以计算全系统逐年费用，并折算成总费用现值。根据费用现值最小的原则并结合其他社会及技术因素以选定方案。方案对比法应用广泛，但研究的方案有限，存在可能漏掉最优方案的缺点。

（2）模型优化法。根据工程问题，建立优化模型，将与水能利用有关的各种因素作为一个系统进行优化。从所有可能的方案中进行筛选，达到整个系统优化的目的。因水能利用的优化是涉及面很广的、非线性的时空优化问题，模型很复杂，需根据不同的问题和情况建立合适的模型。（见水能利用优化）

简史　早期，人们以直接的方式利用水能，即以水车、水磨等将水能直接变为机械能加以利用。19世纪末叶，随着机械、电气和输电技术的发展，使水力发电逐渐成为水能利用的主要形式，1878年法国建成了世界上第一座水电站。西方国家从20世纪30年代起开始系统研究水能利用。初期，只限于研究单个水电站的开发，主要涉及开发形式、河川径流特性、水库径流调节方法及工程经济评价。随着水能资源的大量开发，人们开始进行河流梯级开发和水资源综合利用等问题的研究。随着电力系统的形成和发展，逐步开展水电站在电力系统中的作用及其与火电厂的联合运行方式的研究。西方工程经济的原理和方法逐渐与水电工程相结合，经济评价考虑以复利形式计算的资金的时间价值，方案选择以费用现值最小为原则，并相当重视财务的评价。20世纪50年代以后，由于系统工程和优化方法的发展以及电子计算机的广泛应用，与经济评价结合，水能利用作为一门学科，得到很快发展和提高。以水电站群的优化为标志，从水资源系统和电力系统最优化出发进行的水能利用研究，达到了新的水平。

苏联的水能利用研究也始于20世纪30年代，在径流调节方面与西方各国相似；电力电量平衡多用确定型；在经济评价方面，以“设计水平年”为确定水电站规模及效益的年份，不考虑水电效益随时间的变化，以“抵偿年限”或“计算支出”为经济评价标准。20世纪70年代以后，逐步应用考虑资金时间价值的理论和方法。

中国在1949年以前采用西方的方法进行水电开发的经济评价，20世纪50年代开始，应用苏联的准则和方法。70年代初期，开始在水能利用研究和规划设计中应用电子计算机，70年代后期引用西方考虑资金时间价值的经济理论、系统工程理论和优化方法。80年代以来，在地区及跨地区一次能源规划及电力系统电源规划、地区及跨地区水电发展规划、水电站（群）径流补偿调节计算及水电站（群）水库运行调度等方面，有较大的进展。90年代以来，对考虑资金时间价值的经济理论和方法的应用日臻完善。

shuineng liyong youhua

水能利用优化　(optimization of hydropower utilization)

应用系统工程的思想和系统分析优化方法，研究水能利用问题，达到最合理地利用水能资源的理论和方法。

研究任务　其内容涉及从一次能源开发、二次能源转换、电力传输及分配等各环节的技术经济问题。包括：①电力系统能源的构成；②电力系统电源选择和水电站的开发时序；③河流水电梯级开发方式和开发方案，抽水蓄能电站选点规划方案；④水电站主要特征值优选（如水位、装机容量及机组机型和装机程序等）；⑤水电站水库（群）的运行方式；⑥水电站在电力系统中的运行方式等。这些问题涉及空间和时间相互影响的两个范畴，并且很多关系都是非线性的，因此水能利用优化是一个非常复杂的问题。用常规方法难以求得满意的结果，故需要应用系统工程的思想和系统分析的优化方法。

优化算法　由于水电规划问题的复杂性，对一个规划问题的求解，往往需要根据问题的性质，应用多种数学规划的方法。

动态规划　多阶段决策的数学方法。创始人R.贝尔曼(R. Bellman)阐述动态规划（dynamic programming，DP）最优性原理：“一个最优策略有这样的特性，不论初始状态和初始决策如何，相对于一个决策所形成的状态来说，余下

的决策必定构成一个最优策略”。其特点是将决策变量和状态离散化，用递推法进行逐阶段决策，直到最后一个阶段，形成最优决策。该方法适宜于多阶段决策的优化问题，也可将多维的问题化为一维的多阶段问题来处理。其优点是思路简单明了，易于构模，且能解决复杂的非线性问题；缺点是没有经典的解法，且当规划规模过大时，常因决策变量过多，形成“维数灾”而难于求解。为了解决“维数灾”的问题，又发展了多种改进的动态规划方法，如状态增量动态规划（state incremental dynamic programming，SIDP）和离散微分动态规划（discrete differential dynamic programming，DDDP）等。动态规划广泛应用于水库优化调度（见*水电站水库优化调度*），也有人试图用以解决电站群特征值优选及电力系统电源优化问题。逐步优化算法（progressive optimal algorithm，POA）及改进逐步优化算法（improved progressive optimal algorithm，IPOA）是动态规划的一种扩展，它是将 n 个阶段决策问题化为 n 个一阶段的子问题来求解，即在前一阶段及下一阶段的状态均为已知的情况下求面临阶段决策，逐步循环迭代，求最优解的方法。其子问题的优化，可用各种优化算法。

线性规划（linear programming，LP） 目标函数和约束方程都是线性的数学规划方法。常用改进单纯形法求解。这种方法是对有限的角点进行迭代，寻求最优解。此法很成熟，广泛应用于经济模型、系统水电站和火电厂运行模拟（即*系统电力电量平衡*）等。有些非线性的问题，如水电站（群）*径流调节*等，也可用逐次线性化的办法用线性规划来求解。缺点是决策变量只限于连续变量。

非线性规划（non-linear programming，NLP） 目标函数和约束方程中至少有一个是非线性的数学规划方法。常用各种搜索方法来求解无约束非线性规划问题。对于有约束非线性规划问题，用罚函数法，将有约束问题化为无约束问题，然后用搜索法来寻优。适宜于解非线性的问题，如水电站（群）径流调节。求解很复杂，且要求问题是“凸性”（即“单峰特性”）的，否则可能找不到整体最优解。为了保证找到整体最优解，可能还要进行量纲的变换及应用其他方法求初始解，作为搜索的起点。

混合整数线性规划（mixed integer linear programming，MILP） 含整型及连续变量的、目标函数和约束方程均是线性的数学规划方法。特点是利用整型变量，将非线性规划的问题化为线性问题来解。整型变量常用来描述研究对象的状态，如用0-1变量描述电站是否投产（0为未投产，1为已投产），或用整型变量描述电站的装机台数或输电线的回路数等。常用分枝定界法求解，即对每一个整型变量进行搜索，每次搜索均要进行一次线性规划，根据搜索结果进行“剪枝”（即剔除被淘汰的整型变量），搜索完毕即得最优解。该方法可用于解河流水电开发规划、电力系统电源优化和地区*水电发展规划*。

纯整数规划（integer programming，IP） 变量均为整数的线性的数学规划方法。常用隐枚举法求解，可用于电力系统机组检修容量平衡，但计算工作量很大。

其他算法 包括：①大系统分解协调法。将大规模的问题化为多个较小的子问题来求解，并用耦合变量对各子问题进行协调，以求得大规模问题的（近似）最优解。②网络流规划。属于线性规划的一种，可求解较特殊的线性规划问题。③多目标规划。多用于求解综合利用工程的问题。④其他模糊数学方法等。

为了求解各种数学规划问题，需要有强功能的数学规划软件包。软件包一般拥有或多或少的各种规划问题的解题器，用户用各种规划方法建立的模型，要应用数学规划软件包来求解。

优化模型 一般可分整体优化模型和局部优化模型两种，前者对问题进行全面的优化，后者是前者进行局部优化的子模型。

整体优化模型 用于：①电力系统能源的构成优化；②电力系统电源优选；③水电站开发时序优选（即*水电发展规划*）；④水电开发方式和开发方案优选；⑤水电站特征值优选。其中第①～③项属于能源的宏观规划，第④项为水资源的优化，第⑤项为微观规划。它们是相互联系又各有侧重的统一体，属于投资优化决策。目标函数为全系统（电力系统和水资源系统）现值费用最小。能源系统应包括一次能源生产，二次能源转换、传输和消费各环节。水资源系统应包括水资源各主要用户。约束条件应包括能源及水资源需求约束、资源约束、电站及水库运行约束3个方面，但在不同的阶段对不同的优化对象有所侧重。

近二三十年来，世界各国构造了许多电力规划模型，如国际原子能机构的WASPⅢ模型、法国电力公司（EDF）的MNI/POP和PCHAIN模型等。大部分模型均能较充分地反映火电厂及电力系统的特性，有的还考虑了负荷的随机性、失负荷概率和系统的可靠性，按随机型进行电力系统运行模拟。但对水电的优化，大都考虑得很粗略，尚不能较好地解决有关水电站，特别是水电站群的规划问题，如WASPⅢ模型对水电站的投产，是预先确定的；MNI/POP和PCHAIN模型则以水电站的费用小于或等于系统未供电的边际费用的原则作为水电站投产决策的依据，只适用于容量较小的水电站。加拿大的CAPRI模型为混合整数规划模型，可进行水电规划，但对电力系统描述比较粗略，是一个财务模型。

20世纪70年代末期以来，中国进行整体优化模型的研制工作，取得了较大的进展，研制出一些模型。这些模型都是基于确定型的电力电量平衡，主要有：①混合整数规划和线性规划结合的模型。该模型兼有自动寻优以及对离散的方案进行评价的功能，含系统电源优化、水电站和火电厂装机容量及动力煤矿规模的优化、分系统间的功率交换和主网架的优化等。其特点是，水电站水库群的径流调节和系统电力电量平衡是与上述各项决策的优化同时完成的，较好地反映了水电的特性，较好地解决了水电规划的复杂问题，已应用于中国水电中长期发展战略的大型规划。②动态规划模型。含径流调节和电力电量平衡两个子模型（子模型的解法各异），并以动态规划进行整体决策。模型简单易懂，但存在尚待解决的“维数灾难”（见*水电站水库优化调度*）和“后效性”（即先建坝后装机）的问题。③其他模型，如类梯度筛选法模型等。

局部优化模型 一般为系统模拟模型，是在不增加投资，或投资已定的情况下进行运行模拟，寻求运行费用最小或发电效益最大的运行决策方案。主要有电力电量平衡（电

站运行模拟）模型和水电站水库群补偿径流调节模型两种。

（1）电力电量平衡（电站运行模拟）模型。该类模型都是线性规划的模型，分为确定型和随机型两种：①确定型，即系统负荷及备用容量均为已定值，系统的电源必须严格满足系统容量和电量的要求。②随机型，即系统负荷和各电站运行机组数均是随机的，当系统容量和电量不能满足时，应考虑停电损失，费用均为数学期望值。

模型的目标函数一般为现值费用最小。对于火电厂的煤耗费用，有的按线性处理，有的按非线性处理。

模型的约束条件主要有：①能量和容量（确定型模型含备用容量）平衡约束。②电站运行工况约束，含水电站预想出力、火电厂技术最小出力、“抽水蓄能电站”发电和抽水工况约束、电站调峰能力约束等。③水电站综合利用约束。④输电线输电能力约束。为减少非零元素，常将离散后的系数日（或周）负荷按大小次序排成日（或周）负荷历时曲线，用Z替代法，即将系统负荷和电站的出力，处理成相邻时段间的增量值。

系统电站机组的最优检修计划，是一个整数规划的问题，由于整数规划解题规模的限制，对大系统来说是很困难的。

（2）水电站水库群补偿径流调节模型。它是一个非线性规划的问题，其目标函数和部分约束条件（如出力、库容与库水位的关系，泄流量与尾水位的关系及发电流量与水头损失的关系）为非线性的。

目标函数有两种处理方式：①当有上层总体优化模型传送边际费用信息时，宜用最小费用或最大效益。②无边际费用信息时，常在总保证出力极大化的基础上，寻求发电量极大化。约束条件主要包括：①水量平衡方程（含上游库调节的影响）。②水库状态及其连续方程。③能量平衡方程。④梯级水位重叠约束，即上游梯级尾水位不低于其下游梯级水库的运行水位。⑤水库运行约束，即与正常蓄水位和死水位相应的最大和最小库容约束。⑥电站约束，含装机容量和预想出力约束。⑦系统约束，含电站最小出力和跨流域电力补偿调节输电能力约束。⑧综合利用约束，防洪、泥沙及库内航运常在一年内的各时段，以最大或（和）最小库容为约束；灌溉、给水及下游航运，在一年内各时段以最小流量（或换算为最小出力）为约束。其中，⑦～⑧为界约束，在计算中以变量的界进行处理，不占方程数。

模型可包括动态规划模型、非线性规划模型、线性规划模型和逐步优化法4类。①动态规划模型。广泛用于单库的优化径流调节（见水电站水库优化调度）。库群的径流调节有一些特殊的处理，将多库问题划为两库的问题来求解。如库偶法，是应用聚合分解的原理，把n个水库的联合运行问题，分解为$n-1$对库偶的两库联合运行的子问题来解。目标都是在满足与设计保证率相应的保证出力的前提下，求发电量最大。②非线性规划模型。将库容曲线和尾水位流量关系曲线进行曲线拟合，求得非线性表达式和相应的非线性约束方程，目标函数为非线性的。用混合罚函数和寻优方法求解。为了有把握求得整体最优解，常用其他方法求初始解。③线性规划模型。常用函数变换的办法，将非线性的目标函数线性化，并用多直线段近似库容曲线和尾水位流量关系曲线。用多次解线性规划的迭代法，逼近非线性的最优解。④逐步优化算法。将n时（阶）段优化问题，分解成n个1时（阶）段的子问题，逐时（阶）段对水库状态进行迭代求解。每个子问题是在前时（阶）段及下时（阶）段状态已定的情况下，优化面临时（阶）段的状态。子问题间以系统状态相联系，大大简化了计算。从一个初始状态起，逐次对多时（阶）段的子问题进行优化，周而复始进行迭代计算。当前一轮各时（阶）段的状态与后一轮各对应时（阶）段的状态充分接近时，即为最优解。各时（阶）段子问题的优化，可应用各种优化算法，其收敛速率决定于初始状态。

简史 早期，主要应用古典的优化技术进行静态的优化，如拉格朗日乘数法应用于水电站群的装机容量的分配。1957年，美国的J. D. C. 李特尔（J. D. C. Little）应用动态规划方法进行大古力水电站水库调度，是现代优化方法在水能利用的开始。1964年，P. 马西（P. Massee）和R. 吉布拉特（R. Gibrat）提出线性规划模型，法国电力公司用其进行了3个五年电力规划。1969年，W. S. 布彻（W. S. Butcher）等人提出兴建水利工程的初级动态规划决策模型，以工程建设投资现值最小为目标函数，只适用于单一目标的单一水库，算法较落后，且可能遗漏最优解。20世纪70年代，世界银行的D. 安德森（D. Anderson）等提出Z替代法，显著地减少了线性规划的方程数量，使得大型规划易于实现。1971年，T. L. 莫林（T. L. Molin）和A. M. 厄索比（A. M. Esogbue）改进了布彻的模型，采用“嵌入状态空间”的新动态规划算法，大大减少了计算工作量，且不致漏掉最优解。1973年，D. 艾林考特（D. Erlenkotter）提出整数动态规划的模型，以0-1变量表示工程未修建和已修建；J. 凯珀（J. Kuiper）和L. 奥托拉诺（L. Ortolano）提出解水、火电联合排序的动态规划整体模拟模型，对不同工程方案进行运行的模拟，从而选出其中最优的方案。1974年，L. G. 米滕（L. G. Mitten）和C. A. 曹（C. A. Tsou）也提出相似的模型，用隐枚举法求解，并改进了算法；L. 贝克尔（L. Becker）和W. W. G. 叶（W. W. G. Yeh）提出动态规划与线性规划结合的模型，解决水利工程开发的次序、时间和规模问题。70年代以后各类电力规划模型相继研制成功，但均未能满意地解决含水电站群的电源规划。

中国从20世纪50年代末起研究水库优化运行。70年代末期开始对红水河、长江上中游、澜沧江和乌江优化开发的研究，提出了一些模型，其中较有代表性的有IRELP/I及其提高型SIRELP混合整数规划与线性规划模型、大系统分解协调的线性规划模型DECIRELP、GESP线性规划模型和其他动态规划模型。

参考书目

钱颂迪，等．运筹学．3版．北京：清华大学出版社，2005．

shuineng ziyuan

水能资源

（hydropower resources） 蕴藏于河川和海洋水体中的势能和动能。又称水力资源。水能资源利用以河川水能资源为主，潮汐能占小部分，波浪能尚处于试验阶段。水能资源属于可再生能源，一般按多年平均年发电量进行统计，分为理论蕴藏量、技术可开发量和经济可开发量。

理论蕴藏量 水能资源理论计算值。世界各国在计算精

度上不尽相同，计算结果差异也较大。有的按地面径流量和高差计算，有的则按降水量和地面高差计算。中国采取将一条河流分成河段，按通过河段的多年平均年径流量及其上下游两端断面的水位差，用下式计算河段的理论蕴藏量

$$E=\rho gQHt$$

式中 E 为按多年平均年发电量计算的理论蕴藏量，W·h；ρ 为密度，kg/m³，淡水密度取 1000kg/m³；g 为重力加速度，取 9.81m/s²；Q 为通过河段的多年平均流量，m³/s；H 为河段两端水位的高程差，m；t 为一年的小时数，取 8760h。

一条河流、一个水系或一个地区的水能资源理论蕴藏量是其范围内各河段理论蕴藏量的总和。

技术可开发量　在当前技术水平条件下可开发利用的水能资源量。根据各河流的水文、地形、地质、水库淹没损失等条件，经初步规划拟定可能开发的水电站，统计这些水电站的装机容量和多年平均年发电量，称为技术可开发量。按技术可开发量统计的多年平均年发电量比理论蕴藏量少。差别在于，计算技术可开发资源时：①不包括不宜开发河段的资源；②对可开发河段，考虑了因水轮机过水能力的限制、库水位变动和引水系统输水过程中的损失等因素，部分水量和水头未能被利用；③采用实际可能的能量转换效率，能量转换效率 $\eta<1.0$。技术可开发量随技术水平和社会、环境等条件的变化会有所变化。

经济可开发量　具有经济开发价值，即与其他能源相比具有竞争力且没有制约性环境问题，以及制约性水库淹没处理问题的水能资源量。经济可开发水电站是从技术可开发水电站群中筛选出来的，故其数值小于技术可开发资源。经济可开发量与社会经济条件、各类电源相对经济性等情况有关，故其数量不断有所调整。

shuini

水泥　（cement）　细磨的矿物质水硬性胶凝材料。水泥加适量水搅拌成塑性浆体，在常温下产生物理和化学变化，能在大气中或水中凝结硬化，进而具有一定的强度和胶结力。它可将砂石等松散材料胶结成坚硬且耐久性很强的水泥砂浆和混凝土，是工程建设中使用最广泛的一种多功能人工建筑材料。配有钢筋的水泥砂浆或水泥混凝土，是生产受拉构件的良好材料。

分类　随着水泥工业的发展，世界各国除生产出许多优质通用硅酸盐水泥外，还生产出各种专用水泥和特种水泥。

通用硅酸盐水泥　土木建筑工程中最常用的水泥，分为硅酸盐水泥、普通硅酸盐水泥、火山灰质硅酸盐水泥、矿渣硅酸盐水泥、粉煤灰硅酸盐水泥和复合硅酸盐水泥等。它们由硅酸盐水泥熟料与各种混合材料组成。硅酸盐熟料的矿物成分主要是硅酸三钙、硅酸二钙、铝酸三钙和铁铝酸四钙。

专用水泥　主要有油井水泥、耐热水泥、水玻璃型耐酸水泥和砌筑水泥等。主要用于油、气井和化工等工业部门。

特种水泥　其种类繁多，其中发热量较低的水泥有中热硅酸盐水泥、低热硅酸盐水泥、低热矿渣硅酸盐水泥等。水利水电工程大体积混凝土中大量使用的有中热硅酸盐水泥、低热微膨胀水泥等。在受硫酸盐侵蚀部位常用抗硫酸盐硅酸盐水泥。其他如高铝水泥、自应力水泥、快硬硅酸盐水泥等则用于锚杆补强或堵漏等施工中。使用具有碱活性的骨料时，常采用低碱水泥，其碱含量一般不大于 0.6%。另外，在建筑装修等工程中常用白水泥，它可掺入颜料，调制成各种美丽的彩色。

主要性质　有比重与表观密度、细度、强度、凝结时间、安定性和水化热等。

比重与表观密度　普通水泥的比重一般为 3.1，表观密度一般为 1300kg/m³。

细度　水泥颗粒的粗细程度。水泥细度大多以比表面积表示，即 1kg 水泥的总表面积（m²），一般不得小于 300m²/kg，中热水泥和低热水泥的比表面积应不低于 250m²/kg。矿渣硅酸盐水泥等细度以筛余表示，要求 80μm 方孔筛筛余不大于 10% 或 45μm 方孔筛筛余不大于 30%。水泥颗粒越细，其强度越高。

强度　水泥产品的强度以强度等级表示。水泥的强度等级按照规定龄期的砂浆试件抗压强度和抗折强度划分，与国际划分标准一致。水工混凝土采用最多的水泥强度等级为 42.5。

凝结时间　分为初凝时间和终凝时间，水泥加水搅拌到开始凝结丧失工作度的时段称为初凝时间，到凝结终了产生强度的时段称为终凝时间。硅酸盐水泥的初凝时间不小于 45min，终凝不大于 390min。普通硅酸盐水泥等初凝时间不小于 45min，终凝不大于 10h。中热硅酸盐水泥等初凝时间不小于 60min，终凝时间不大于 12h。

安定性　水泥在硬化过程中体积变化的均匀性。水泥中游离氧化钙、氧化镁或三氧化硫含量较高时，可能导致水泥结构不均匀变形而破坏水泥结石。用沸煮法检验必须合格。

水化热　水泥与水作用产生放热反应，在整个水化过程中放出的热量称为水化热。水化热能加速水泥硬化、提高强度，但大体积混凝土积聚的热量过高，如不使之散发，会使混凝土产生温度应力而导致混凝土开裂或破坏。

shuiqing zidong cebao xitong

水情自动测报系统　（automatic system of hydrological data telemetering and forecasting）　应用遥测、遥控、通信、计算机和水文预报等技术，完成江河、水利水电工程流域内水文数据自动实时收集和处理，并做出实时预报的系统（见图）。利用水情自动测报系统可实现防洪、供水、发电等的优化调度，并具有提高防洪能力和水资源利用率等社会经济效益。





水情自动测报系统

通常水情自动测报系统由一个中心站和若干个遥测站组成。遥测站按照其类别划分，主要包括水文站、水位站、闸位站、雨量站、气象站等。遥测站实时自动采集水位、雨量

等水情数据并按要求发送至中心站。中心站实时接收各遥测站发送的水情数据，通过计算机分析计算，及时完成水情作业预报。遥测站主要由传感器、数据采集器、通信设备、电源设备等组成。中心站主要由计算机、通信设备、电源设备、网络设备及相关软件组成。

工作体制　系统遥测站向中心站发送信息的基本工作体制有自报式、应答式两种。①自报式是系统各遥测站按照设定的时间间隔或被测参数发生一个规定量值变化时，自动进行数据采集并向中心站发送。②应答式是系统各遥测站按照中心站发送的查询指令，自动进行数据采集并向中心站发送。根据系统建设实际条件和需要，也可采用自报和应答兼容的混合式工作体制。系统工作体制应根据系统的功能要求、通信方式及组网方案等条件，按照经济合理、便于维护的原则，进行合理选用。

通信方式及组网　系统通信方式主要包括短波、超短波、卫星通信，以及移动通信、公用电话等5种。各种通信方式其特点和适应性不尽相同，在进行通信方式选择时，应结合不同通信方式的特点、系统的实际条件，进行合理选用。①短波通信。主要靠电离层的发射进行通信，其通信距离较远，受地形影响较小，但其信号不稳定、受外界干扰较大，且设备投资大、功耗高。在水情自动测报系统中已很少采用。②超短波通信。信号传播较稳定，通信质量较高，但受地形和距离的限制，在距离远、地形复杂的情况下需设立中继站（级数不宜超过3级）。该方式较适宜于遥测站距离较近，中继站建设及维护条件较好的地区使用。③卫星通信。具有传输距离远、覆盖范围广、通信频带宽、信道质量好以及组网灵活等特点。用于水情自动测报系统的卫星主要有海事卫星、北斗卫星和VAST通信卫星。根据各类卫星信道的特点，北斗卫星和海事卫星主要适用于遥测站与中心站之间的通信，VSAT通信卫星则主要用于中心与分中心，或与其他系统之间大容量数据传输使用。④移动通信。是一种成熟稳定和应用广泛的通信技术，主要包括SMS短信息、GPRS分组无线传输两种方式。该通信方式具有设备简单、通信质量稳定、运行成本低廉等优点，但受通信网络覆盖的限制，独立性较差。随着移动通信网络的不断建设完善，其应用前景较好。⑤公用电话。主要利用公共电话网络进行数据传输，具有建设维护简单、运行成本低廉等优点，对于公共电话网络发达且网络稳定的地区比较适合。通信组网根据系统建设的实际条件和具体要求，可采用单一通信或混合通信组网方案。

沿革　日本、美国等发达国家，从20世纪60年代相继开始研究建设水情自动测报系统。中国自20世纪70年代起，开始研究建设水情自动测报系统。90年代以来，中国在水情自动测报系统技术、应用方面取得了长足的发展，大中型河流及水利水电工程基本均建成水情自动测报系统，洪水预报的精度和有效预见期明显增加。同时，颁布了SL 61—2003《水文自动测报系统技术规范》、NB/T 35003—2013《水电工程水情自动测报系统技术规范》、DL/T 1085—2008《水情自动测报系统技术条件》、DL/T 1014—2006《水情自动测报系统运行维护规程》等一系列规程规范，使水情自动测报系统在设计、建设及运行管理方面更趋于规范化、标准化。

shuisheng shengtai baohu

水生生态保护　(conservation of aquatic ecology)

针对水电工程对水域生态的不利影响而采取相应的生态保护措施。水生生态保护从维持河流生态系统健康的角度出发，既保护河流生态系统的基本结构和功能不受到伤害，生态系统的各种功能都能正常进行，又能够提供各种人类需要的服务，使其具有可持续性。针对不同的水电建设项目对水域生态的影响程度，因地制宜地制定相应的生态保护措施。主要措施有：水生生物栖息地保护、过鱼设施、鱼类增殖放流、下泄生态流量、划定禁渔区和禁渔期、加强渔政管理等。

水生生物栖息地保护　在水电开发过程中通过建立自然保护区或者划定一定保护河段对水生生物的重要生境进行保护。

过鱼设施　人工辅助鱼类通过水电站闸坝等障碍物的设施或技术措施。其主要作用在于让鱼类繁殖群体越过大坝，为亲鱼繁殖、鱼卵孵化、幼鱼索饵以及为幼鱼和繁殖后的亲鱼降河等创造必要条件，也为大坝上下游鱼类种群的基因交流提供条件。建设有效的过鱼设施，可减小大坝对鱼类造成的不利影响。

鱼类增殖放流　人为地增加鱼类（渔业）资源量，补偿由水电站建设导致的渔业资源遭受的损失，缓和鱼类（渔业）资源的波动。人工增殖放流是补偿水电工程建设对鱼类资源影响的措施之一，即采取人工繁殖的方法培育苗种，投放到自然水域，使其自然生长，补充水域鱼类资源量和自然繁殖群体，见图。鱼类增殖放流通过鱼类增殖站来完成，主要考虑增殖放流目标、放流对象、增殖放流工艺流程、放流规格、特征参数、工作内容和配套设施等因素。



雅砻江锦屏、官地水电站鱼类增殖放流站

下泄生态流量　引水式和混合式电站引水发电以及堤坝式电站调峰运行将使坝下河段减（脱）水，水文情势的变化将对水生生态、生产和生活用水、河道景观等产生一系列不利影响。为维护河流的基本生态需求，水利水电工程必须下泄一定的生态流量，将其纳入工程水资源配置中统筹考虑，使河流水电动能经济规模和水资源配置向“绿色”方向发展。

划定禁渔区和禁渔期　通过划定一定的区域或者时间禁止捕捞鱼类来保护渔业资源。

加强渔政管理　在鱼类比较集中分布的区域或时间，通过渔政管理的手段来保护鱼类资源。

shuisheng shengtai yingxiang

水生生态影响

（impact on aquatic ecology）　水电站施工建设、水库淹没及电站运行对水生生态系统及其生物因子、非生物因子所产生的作用。水电工程对水生生态的影响主要包括工程对水生生境的影响、对鱼类及其他水生生物的影响等方面。

对水生生境的影响　对水生生境的影响主要包括对水库生境的影响和对坝下游生境的影响两个方面。

对水库生境的影响　水电工程拦蓄江河径流，对天然河流水文情势产生明显影响。影响最大的是多年调节型水库，影响相对较小的是日调节水库。水库水位的变化与天然情况下不同，其变化取决于不同类型水库的调节方式。与天然河道相比，水库的不同库段，流速变化不同。一般情况下，靠近库尾，流速接近天然河段；越靠坝前，流速越小。水流速度减缓时，泥沙沉淀，水体透明度增加。

水深和流速的变化，水库淹没区的自然环境条件以及水库的调度运行方式会对库区的水质产生影响。径流式电站对水库的水质影响较小，多年调节的水温分层型水库对水质影响较大。

对坝下游生境的影响　工程建成后，经水库调节，年内径流会有所变化，汛期洪水流量下泄平缓，枯期下泄流量会增加，此外还存在下泄不稳定流的影响。分层型水库会下泄低温水；坝下清水下泄，含沙量减少，冲刷加强，将改变鱼类的栖息地生境，营养物也会相应减少。此外，引水式开发电站在坝址至发电厂房间存在减水河段，此类减水河段在河流枯水季节径流减少非常显著，鱼类栖息生境大幅缩减，对水生生物和鱼类影响较大。

对鱼类的影响　对鱼类资源的影响主要包括阻隔和生境片段化的影响、低温水对鱼类的影响、水文情势对鱼类的影响、水质变化对鱼类的影响几个方面。

阻隔和生境片段化的影响　对于鱼类的上、下游活动，大坝的分割阻隔效应是明显的。受大坝分割阻隔影响的鱼类一般是洄游性种类。一些河流上的多梯级电站还使得鱼类原有的生存空间被分割为多个破碎段，鱼类基因交流的范围缩小，削弱了上、下种群的生存力，同时也降低了鱼类选择新栖息环境的可能。

低温水对鱼类的影响　年调节和多年调节的大库，由于水深、水体交换量少，容易产生水温分层现象，下游河道夏秋季水温一般低于天然河道水温。水库下泄的低温水，对鱼类的直接影响是导致繁殖季节推迟，当年幼鱼生长期缩短、生长速度减缓、个体变小等。

水文情势对鱼类的影响　库区河段水库流速变缓，适宜喜缓流鱼类生存，但影响喜急流鱼类的鱼卵和幼鱼漂流发育。坝下河段流量、水位变化会对鱼类繁殖的生境条件产生影响。

水质变化对鱼类的影响　水库水流变缓，使库区及坝下江段水体透明度增加、水质变清，影响鱼类的饵料生物，引起鱼类种群结构更替。溶解氧降低对土著鱼类生存不利。

水电工程施工期生产废水及生活污水若不进行处理直接排入水体，将对鱼类产生一定的影响，因此应设置水处理设施。

高坝大库泄洪时，有可能存在气体过饱和影响。

对其他水生生物的影响　水库形成后，河流生态特征向湖泊生态特征转变，水域面积增大，水流变缓，大部分库区透明度显著增加，光、热条件得到改善，利于库区藻类、原生动物、轮虫等浮游动物的生存，其种类和数量将显著增加。库区水深增加，含氧量在一定程度上降低，原自然河道的滩、槽、沱等河床地貌消失。这将对底栖动物群落产生显著的负面影响，总的趋势是种类和数量都将减少，如原有适应于急流浅滩生活的蜉蝣类、石蚕、石蝇等将在深水区完全消失，仅在库缘和侧沟口残存。

在电站运行后，一些库湾地区可能会出现一些水草，但由于水库水位变化以及库岸多为岩石等原因，建库后水生高等植物的增加量有限。

shuisheng shengwu qixidi baohu

水生生物栖息地保护

（protection of aquatic hydrobios habitat）　在水电开发过程中对水生生物的影响通过建立自然保护区或者划定一定保护河段对水生生物的重要生境进行保护的措施。

保护自然资源和生态环境的一项重要措施就是水生生物栖息地保护，通过保护具有典型意义的生态系统和自然环境，以维持物种生存，保证生物资源的持续利用。划定水生生物栖息地的原则主要有：在具有代表该流域自然生态系统的典型地区；自然生态系统已遭破坏，但有可能恢复和更新的地区；主要鱼类生活、栖息、繁殖区；拥有该流域鱼类多样性较丰富的地区；考虑有较强管理能力的地区。

中国长江上游珍稀特有鱼类国家级自然保护区是为维护长江上游鱼类种群多样性和长江上游自然生态环境，合理持续利用渔业资源，补救因水电工程建设和经济建设等人为因素对自然生态系统造成的影响，及时拯救长江上游濒危鱼类而建立，水域生态环境极具代表性。此外，为减缓乌江水电开发对水生生态的不利影响，有效保护乌江长溪河渔业资源、珍稀特有鱼类的生态环境，建立了长溪河鱼类自然保护区。

早在20世纪初，美国就在许多重要流域或河段设立了鱼类避难所或庇护所，禁止渔业捕捞等开发活动。如密西西比河上游的国立野生动物和鱼类避难所建立于1924年，为当地134种鱼类提供了栖息地和育肥场，成功保护了鲟鱼等重要资源。

shuitanxing lilun

水弹性理论

（hydroelasticity）　研究以水为代表的各种稠密液体与周围可变形固体组成的统一体系中，两种介质之间的力学相互作用的理论。水弹性动力学是流体力学和固体力学交叉的一个分支学科。

水弹性问题主要是关于动水压力和固体弹性系统响应的相互作用问题。当存在水弹性相互作用时，流体的压力是一种作用在弹性系统的外荷载，但它的大小却取决于弹性系统的位移、速度或加速度，从而出现流固耦合的各种力学现象。如裂隙岩体渗透场与位移场（或应力场）存在的耦合效应。当岩体承受裂隙渗压或其他载荷后，将引起岩体位移的重分布以及导致隙宽的改变，并再次引起渗压的重分布。如

此反复，直到渗流场与位移场彼此相互协调。隙宽和渗流的函数关系成为岩体裂隙渗流场与岩体应力场水弹性静力耦合的关键因素。

流水中结构物的水弹性振动及流激振动现象中的惯性、阻尼和刚度耦合效应。在微幅振动条件下，水弹性动力问题的一般运动方程可写成

$$[M_E+M_H]\{\ddot{q}\}+[C_E+C_H]\{\dot{q}\}+[K_E+K_H]\{q\}=\{F\} \quad (1)$$

式中 $[M_E+M_H]$、$[C_E+C_H]$ 和 $[K_E+K_H]$ 分别为水弹性系统的组合质量矩阵、组合阻尼矩阵和组合刚度矩阵；下标 E 表示弹性系统的量，H 表示流体存在产生流固耦合的附加质量、阻尼和刚度项；$\{q\}$、$\{\dot{q}\}$、$\{\ddot{q}\}$ 分别为系统的广义位移、速度和加速度矢量；$\{F\}$ 为外加激励力矢量。

与经典弹性动力学一样，水弹性动力学研究的也是自由振动和动力响应两大基本问题。

(1) 自由振动问题。主要研究水或其他稠密液体的存在对系统自振特性的影响和水弹性不稳定问题。由于没有外部激励力，式 (1) 中 $\{F\}=0$，并令自由振动的广义位移矢量为$\{q\}=e^{i\lambda t}\{\varphi\}$，则可得水弹性系统的特征方程

$$(-\lambda^2[M_E+M_H]+i\lambda[C_E+C_H]+[K_E+K_H])\{\varphi\}=\{0\} \quad (2)$$

对于 n 个自由度系统，可由式 (1) 求出 n 对复共轭特征值 $\lambda_j=\alpha_j+i\beta_j$ ($j=1, 2, \cdots, n$) 和相应的特征矢量 $\{\varphi\}$。它们是考虑了流体的存在而得到的水弹性系统的自振特性。当计算得出的特征值 λ 是纯虚数或复数时，相应地系统的自由振动便出现水弹性（或流体弹性）不稳定现象。对应于纯虚数，振动位移将以 $e^{\beta t}$ 的形式随时间 t 而增长，称为扩大现象；对应于复数，振动位移将以 $e^{(i\alpha+\beta)t}$ 的形式随时间 t 而振荡增长，称为颤振现象。当水弹性系统处于不稳定时，任何微小的扰动都会引起结构的强烈变位或振动，甚至导致结构的破坏。因此，找出系统进入水弹性不稳定状态的临界条件具有重要的实际意义。

(2) 动力响应问题。主要研究在外力矢量 $\{F\}$ 作用下流体和固体弹性系统相互作用过程中，结构的位移和应力的大小，一般可分为两大类问题：①静水中工程结构的动力响应问题。这类问题的激励力一般是由结构自身的受迫振动引起的。例如，在地震激励下，水坝、水塔、闸门、管道、油罐等弹性结构的抗震问题。②动水中工程结构的动力响应问题。这类问题属于“流体诱发振动”，其外部激励力一般首先是由流体的运动产生的，但弹性体的振动能够对流场产生反馈，并改变原来的流场和作用于固体表面的动水载荷，从而产生机理复杂的水弹性相互作用。流体诱发的水弹性振动，如漩涡诱发振动、脉动流诱发振动、紊（湍）流诱发振动等，都是动水中工程结构水弹性动力响应的典型问题。

参考书目

谢省宗，阜家寿．水弹性力学若干问题的研究和新进展．现代力学和科技进展．北京：清华大学出版社，1997.

shuitou

水头

(water head)　两个测量断面单位水体的能差，以米水柱表示。水电站水头指上、下游水位差，它是构成水电站发电能力的主要动力因素之一。水电站上游水位为库水位（或前池水位）。下游水位，对冲击式水轮机为喷嘴中心高程，对其他型式的水轮机为尾水位。扣除水头损失后的水头叫做净水头；未扣除水头损失的叫做毛水头，也称落差。水流经过水电站水工建筑物（如闸门、隧洞、渠道、调压井及压力管道等）时，产生水头损失。水头损失包括沿程摩阻损失与局部损失两部分。坝式水电站的水头损失较小，引水式水电站则较大。

水头的集中方式　水电站主要通过两种方式获得水头：①筑坝壅高上游水位。②修建引水建筑物（如隧洞、明渠）集中水头。高水头水电站一般具有较优的经济性，世界上有许多数百米乃至千余米水头的水电站。平原河流由于地形、地质、淹没及综合利用（如航运）等限制，往往只能修建低水头水电站，水头有时只有十余米，甚至几米。

水头的变化特性　水电站运行中的水头随入库流量和运行方式而变化。具有调节水库的水电站，其水头主要随库水位而变化，最大水头往往出现在库满时，最小水头多出现在库空时。担负年及以上调节任务的水电站，由于死水位较低，其最小水头常常只有最大水头的 60%～80%。低水头水电站，其水头主要取决于电站下泄流量（发电流量及泄洪流量），当下泄流量大时，由于尾水位升高，导致水头减小。一天内，因进行日调节，各小时出力不同，水头也是有变化的。

具有调节水库的电站，为了增大调节流量，在枯水期需消落水位，导致水头的降低。水电站出力正比于调节流量和水头的乘积，为了获得最大发电效益，要兼顾调节流量和水头。在规划、设计中需正确选定死水位和水库调度方式，使调节周期内获得最大的发电和综合利用效益，达到最有效地利用水资源的目的。

水电站特征水头　包括最大水头、最小水头、平均水头、额定水头和其他特征水头。

(1) 最大水头。通过上游水位与下游水位的组合，扣除相应工况的水头损失，取大值。

(2) 最小水头。通过上游水位与下游水位的组合，扣除相应工况的水头损失，取小值，考虑机组技术要求经分析后取值。

(3) 平均水头。一般包括算术平均水头和加权平均水头，根据长系列径流调节计算成果并考虑电站运行方式后确定。算术平均水头即水头的算术平均值。加权平均水头以电量或出力为权重进行计算。以电能为权重的加权平均水头可表示为

$$H_e=\sum_{t=1}^{T}H_t\times E_t/\sum_{t=1}^{T}E_t$$

式中 H_e 为水电站加权平均水头，m；T 为计算时段数；t 为时段序号；H_t 为 t 时段的净水头，m；E_t 为 t 时段的电能，kW·h。

在选择水轮机时，要尽量使水轮机最大效率在 H_e 附近。

(4) 额定水头。水轮发电机组输出额定功率时的最小水头（见水电站额定水头）。

(5) 其他特征水头。见特征水头和扬程。

shuiwei guance

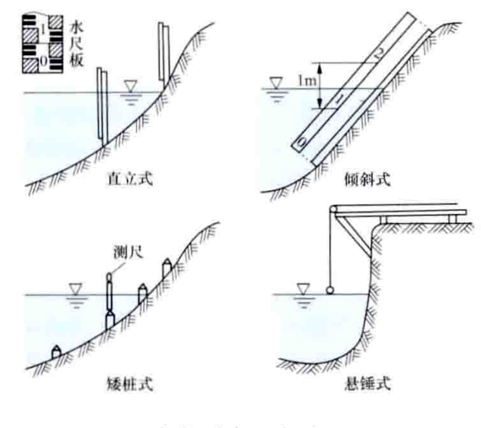
水位观测

(stage observation)　对水位升降变化过程的测量和记录。水位系指河流或其他水体的自由面相对某一基面的高程，以 m 计。中国统一采用黄海基面（见高程），但各流域由于历史原因，仍有沿用以往使用的大沽基

面、吴淞基面、珠江基面，也有使用假定基面、测站基面或冻结基面的。水位资料是水利水电建设、城市交通建设、防洪抗旱的重要依据，也为航运、海港、城市供水等国民经济建设所必需。水位资料是直接为防洪抢险提供决策依据，也是确定堤防、坝高、桥梁、公路路面标高等的设计依据，还为推求其他水文数据提供间接资料，如由连续记录的水位资料通过水位流量关系，推求连续的流量资料。

常用的水位观测设备有水尺及自记水位计两类。

水尺　直接观测水体水位面设置的标尺，有直立式、倾斜式、悬锤式和矮桩式4种，见图。将水尺读数加水尺零点高程求得水位。水尺零点高程为水尺零点与基面的高差。水位基本定时观测时间为每日8时，每日水位观测的段次应根据河流特性及水位涨落变化情况合理分布，以测到完整的水位变化过程，满足日平均水位计算、水文资料整编和水情拍报的要求。



水尺形式示意图

自记水位计　自动记录水位变化过程的仪器，类型有浮子式、压力式、气泡式、超声波式、雷达式、电子式等，根据河流条件及需要选用。电子水尺是在尺面每一个刻度处安置一个感应器而实现自动直接测量水位。由于水位遥测系统及长期自记水位计（配固态储存器的水位计）等技术的发展，无人值守水位观测得以实现，水文数据的自动收集、传输和计算机加工处理等技术也迅速发展。

水位观测的位置应选择在河道顺直，断面比较规则，水流稳定，无分流、斜流的河段，并尽量避开观测不便及有大量工业废水和城市污水排入的地点，使观测成果具有代表性及准确性。

shuiwei-liuliang guanxi

水位流量关系

（stage discharge relation）　江河、渠道横断面上的水位和流量之间的对应关系。即以流量 Q 为横坐标、水位 Z 为纵坐标的水位流量关系曲线，简称 Z-Q 曲线。水位流量关系曲线除在水文站的资料整编中，用以将连续的水位资料转换为连续的流量资料外，在工程设计和施工中常用以推求坝址、厂房尾水出口、导流洞进出口及引水渠进口等处某种流量下的水位高程。水位流量关系是工程设计和施工中的一项基本资料。

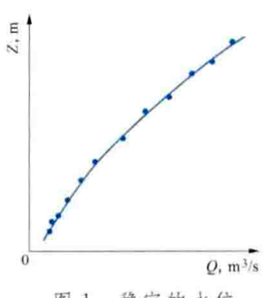


图1　稳定的水位流量关系

天然河道为恒定流状态、断面稳定且不受下游水位影响时，Z-Q 曲线为单一线，如图1所示。洪水期，受流量涨落或断面冲淤变化的影响时，一次洪水过程 Z-Q 曲线会呈绳套形，如图2所示。当断面水位受下游壅水影响时，Z-Q 曲线为以下游水位作参数的一组曲线，如图3所示。

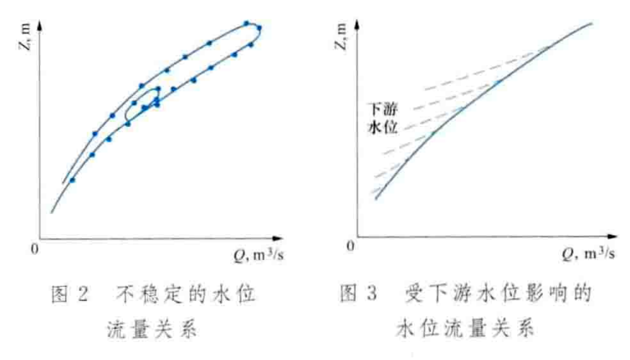


图2　不稳定的水位流量关系　　图3　受下游水位影响的水位流量关系

某一设计断面水位流量关系的确定分为附近有水文站和无水文站两种情况。当某一设计断面附近有水文站时，可根据测流断面的实测资料，点绘水位流量关系，一般尚需进行高低水位部分外延。常用的外延方法有：①利用水位流速关系；②利用 $Z-(1/n)\sqrt{I}$ 关系；③利用 $Q-A\sqrt{R}$ 关系。其中，Z 为水位，n 为糙率，I 为比降，A 为有效过水面积，R 为水力半径。当断面有冲淤变化或受洪水涨落影响，其水位流量关系不稳定时，需先修正为单一的水位流量关系线，再按上述方法外延。当所在河段无水文测站时，一般应在设计断面设立专用水文站或水位站，取得几年的观测资料后，再根据上下游水文站有关资料，推求各设计断面的水位流量关系。设计需要时，也可根据实测大断面、水面线资料、结合河道糙率，采用水力学公式法推算其水位流量关系。由于施工堆渣，下游河道形态常会发生变化，工程设计中应估计工程修建后水位流量关系可能的变化。

shuiwen ceyan

水文测验

（hydrometry）　从水文站网布设到系统收集、整编水文资料的全部技术工作。又称水信息技术。水文测验的内容包括：①水文站网的规划、布设、调整；②技术标准的制定，测验仪器、设备和测验方法的研究；③降水、蒸发、水位、流量、泥沙、冰情、水温、水质和墒情等基本项目的观测；④对资料作系统的整编、汇编和刊布；⑤对已建工程的水库进行水文泥沙观测和实验研究。

水文测验不仅为防汛抗旱、河流规划和水电工程建设提供水文资料，随着经济社会的不断发展，其任务已逐步扩展为水资源合理开发、水环境保护、水工程的科学调度管理服务。就水电开发而言，不同阶段对水文测验工作的深度和广度要求也不同。规划阶段需要流域或规划河段水文资料，一般从已有水文测站上收集，并在选作第一期工程的河段上进行一些专门的观测。设计阶段根据需要和可能，在坝区、厂区、水库回水河段、施工料场等处设立专用水文测站。施工阶段根据施工期水情预报方案，在已有的水文站网基础上还要在上游以及支流增设水情测报专用站。运行阶段为保证工程安全，满足运行调度和实验研究的需求，需设立和完善水情测报专用站网和泥沙监测等实验站。各阶段的工作既有不同的特点，又要保持工作的连贯性，逐步深入，保证水文资料长期不间断地积累，以适应水文现象多变性、随机性的特点。

水文资料整编主要包括：测站考证、对原始资料进行审核、确定整编方法，建立水位-流量关系线、数据整理计算、编制各类图和成果表、单站合理性检查、编写单站整编说明。对单站水文资料整编成果进行上下游测站的综合合理性检查，对整编成果作出质量评价。

水文测验工作是在人类防止水害、兴修水利的过程中逐步发展起来的。公元前3500～公元前3000年，埃及为灌溉引水开始对尼罗河进行水文观测。17世纪，法国塞纳河开始有降雨、蒸发、流量等观测项目和记录。在中国，2000年前李冰父子已用石人作水尺在都江堰观测水位。历代在很多江河上有洪水、枯水石刻和记载。近代正规的水文观测开始年代：雨量为1841年（北京），水位为1865年（汉口），流量为1910年（海河小孙庄）。为水电开发设置的专用水文观测始于1946年（黄河上铨站）。1949年以来中国已建立了全国的基本水文站网，并不断调整充实，同时制定了配套的测验规范，颁布了《中华人民共和国水文条例》等水文行业管理法规。随着科技的进步，现代传感器技术、通信技术、计算机和网络技术已在水文测验中广泛应用，实现了水位、流量、泥沙、水质和气象要素在线自动监测，水文数据的自动采集、传输、分析应用能力得到很大提高。

shuiwen dizhi

水文地质　(hydrogeology)　研究地下水形成、运动、分布、水质、水量等特征与规律对水工建筑物及其周围环境的影响，为对地下水的评价、处理提供必要的资料。与水文地质相关的地形、地质条件称为水文地质条件，是工程地质条件的重要组成部分。

水电工程中的水文地质勘察工作主要有水库渗漏、浸没、地下水对库岸稳定的影响、坝基和绕坝渗漏、基坑涌水、引水隧洞和渠道的渗漏、地下建筑物的外水压力，以及地表水、地下水对混凝土的侵蚀性等方面。

水库渗漏　库水通过库周与库底含（透）水岩层向邻谷渗漏，使电站的发电效益降低。为了评价水库是否产生渗漏，水文地质勘察工作要在查明区域地层、岩性、构造和地貌的基础上，进一步查明透水岩层的分布规律、岩溶洞穴的连通和充填情况、相对隔水层的空间分布规律及其隔水程度、地下水的补排关系，以及地下水分水岭的位置、高程。当水库存在渗漏问题时，需结合渗漏范围、漏水量大小、处理的难易程度和工程量大小等进行具体的技术、经济分析论证。

浸没　由于水库蓄水使库区周边地区的地下水位抬高，导致地面产生沼泽化、盐渍化及建筑物地基条件恶化等次生地质灾害现象。地基浸没的临界深度与地基土在浸水饱和后强度的变化特点、冬天土壤的冰冻深度、建筑物特性等因素有关。农田浸没的临界深度与当地的气候、土质、作物的种类、耕作方法、地下水的矿化度以及灌溉、排水措施等因素有关。浸没评价应根据当地浸没临界值与潜水回水位埋深之间的关系确定。浸没分为初判和复判两个阶段进行。浸没区的防治，一般采取降低地下水位的排水、疏干等工程措施。

地下水对库岸稳定的影响　库岸存在下列情况时，稳定性较差：①库岸存在软弱岩层，如凝灰岩、黏土岩、片岩、页岩或黄土类土、膨胀土等组成的高陡边坡。②库岸岩体存在顺坡向软弱结构面，或岩体被多组软弱结构面切割形成稳定性差的棱形体。③库岸存在滑坡体或巨厚的松散堆积体时，水库蓄水和水位变动，常影响库岸的稳定，尤其是近坝库岸的失稳，对大坝的施工和运行的安全危害更大。水库水位升高，使底滑面岩体饱水，抗剪强度降低，同时该部分岩体新增加的浮托力使底滑面的有效应力减小，进一步降低了底滑面的抗剪强度，易引起塌岸或滑坡；当水库水位较大幅度骤降时，库岸岩体中的地下水位来不及随着水库水位下降，还会产生动水压力，使库岸更易失稳。

坝基和绕坝渗漏　水库蓄水后，在拦河大坝的上、下游形成水位差。在水位差的作用下，库水经坝基和两岸坝肩岩（土）体中的孔隙、裂隙、破碎带或岩溶通道等向下游渗漏。前者称坝基渗漏，后者称绕坝渗漏或坝肩渗漏。坝基和坝肩一带岩体中的地下水渗透途径短、坡度大，单位宽度内的渗漏量要比其他地区大，对坝基和坝肩抗滑稳定有很大影响，危害也较大。若坝基为坚硬岩体，库水沿坝基和坝肩岩体中的裂隙或破碎带渗漏时，在坝基和坝肩岩体中将产生渗透压力。坝基的渗透压力使坝基滑动面上的法向载荷减小，也减小了法向载荷所产生的抗滑力。同理，坝肩处的渗透压力使坝肩岩体的抗滑力也因之减小。这对坝基和坝肩以及坝肩下游边坡稳定都是不利的。坝基渗漏或绕坝渗漏还可能使坝基与坝肩岩体中的软弱夹层、断层破碎带产生软化、潜蚀（管涌）等现象，降低坝基或坝肩岩体的抗滑力与承载力。若坝基为松散土层，表层渗透系数较小、底层渗透系数较大组成的双层结构地层，下游又有大量的农田或居民点时，还要研究由于坝基渗漏和绕坝渗漏是否会使坝基松散土层产生管涌或流土破坏，使下游农田或居民点产生浸没。为了减少坝基和绕坝渗漏量，防止渗流对坝基产生的渗流破坏，以及渗流对软弱夹层产生软化、潜蚀，减小渗流对坝基产生的渗透压力，需对坝基和坝肩岩体进行防渗和排水反滤处理。

防渗处理措施按岩性可分为坚硬裂隙岩层、松散土层和岩溶的防渗处理措施。

(1) 坚硬裂隙岩层的防渗处理措施。一般采用灌浆帷幕防渗（见帷幕灌浆）。当相对隔水层埋藏不深时，常采用封闭式灌浆帷幕；若相对隔水层埋藏过深，根据防渗的要求，也可采用悬挂式灌浆帷幕。灌浆帷幕的材料可根据岩层的可灌性选用水泥灌浆或化学灌浆。如坝基存在断层破碎带或其他软弱岩层，根据破碎带的特征、产状，结合地形和坝的形状、尺寸等情况，辅以混凝土防渗井、防渗墙或铺盖等防渗措施，则效果更好。

(2) 松散土层的防渗处理措施。主要有垂直防渗、水平防渗和排水减压3种。①垂直防渗。常采用的有黏土截水墙、混凝土防渗墙、泥浆防渗槽、灌浆帷幕、钢板桩和水泥高压旋喷式帷幕。②水平防渗。当砂砾石层透水性强，渗流稳定性差，厚度大，垂直防渗比较困难，而坝址附近土料很丰富时，常采用水平铺盖防渗。但水平防渗出逸坡降大，常需于下游辅以排水反滤措施，才能保证坝基渗流稳定。也可用水平铺盖和垂直灌浆帷幕组合应用。③排水减压。对于表层为弱透水层、底层为强透水层的双层结构地基，在渗漏量允许的情况下，也可采用在强透水层中排水的办法来减小渗透压力，防止对坝基产生渗透破坏，一般采用坝下设排水减压井、排水槽或排水坝趾，但需注意防止排水地层发生

管涌。

（3）岩溶的防渗处理措施。根据岩溶发育特点和分布规律，因地制宜地进行。常用的有铺盖法、封堵法、截水墙法和灌浆帷幕法。

基坑涌水　在基坑开挖时，由于基坑处水位下降、压力减小，周围基岩（或土体）中的地下水涌向基坑，当水量过大时，常给施工带来很大的困难，甚至使基坑边坡失稳，有时承压水头过大，还会使基坑底部隆起。常采取灌浆和排水减压相结合的措施防治。

引水隧洞和渠道的渗漏　引水隧洞、渠道沿线的地下水位低于隧洞或渠道中的水位时将产生渗漏，渗漏量的大小视沿线岩层渗透系数的大小而定。防治办法一般采用混凝土衬砌、埋管等。

地下建筑物的外水压力　当地下水位高于地下洞室等顶板时，衬砌将承受外水压力。外水压力的大小视地下水位的高低与围岩渗透系数和衬砌渗透系数相差的倍数而定。防治办法是采取排水减压或灌浆与排水相结合的处理方法来减小外水压力。

地表水、地下水对混凝土的侵蚀性　由于各地表水和地下水所处的地质环境不同，在运动中所富集的盐类、有机质、气体也有所不同，而且随着空间与时间而变化。因此，需要在每年不同水文季节取水样进行水质分析，评价它们对混凝土、金属材料有无侵蚀性；评价它们能否作为混凝土拌制和养护用水或生活饮用水。水质分析的试验项目根据试验目的来选定。

为了查明地下水在上述问题中的影响程度，需通过调查、地质测绘、勘探，查明具体的水文地质条件。为了解含水层与相对隔水层的渗透系数，还需进行压水（注水）或抽水等水文地质试验。浸没调查时还需进行土壤毛细管上升高度的测定。有时地质构造复杂，加上岩层的各向异性，水文地质条件一时难以查清，可借助于地下水长期观测资料进行反馈分析来取得所需资料，得到较满意的效果。

简史　在中国，数千年前的夏朝人们已懂得“凿井而饮”。公元前250年，战国时四川自贡采盐的自流井已经深达几百米，比法国于公元1126年在阿尔土瓦省打的自流井要早1500～2000年。中国的灌溉和水利工作，也开始得很早。公元前256～公元前251年，李冰父子在四川岷江上兴建了都江堰。至少在公元前300多年以前就已开凿坎儿井来浇灌土地。公元前450年开始修凿大运河，运河长达1700多千米。这些巨大的水利工程中遇到许多的水文地质问题。中国古代的一些文献典籍中，如易经、禹贡、水经以及历代各省、府、州、县所修的地方志中，有许多关于地下水的记载。这些古代生产实践中积累起来的宝贵经验，一直未能加以总结，使之发展成为一门独立的科学。同一时期，在世界上水文地质也同样未得到发展。

100多年来，由于大量水利水电、铁路隧洞、油田、采矿等工程的建设，以及解决工矿企业和城市的供水，使水文地质研究得到了飞速的发展，形成了一门独特的水文地质学，并出现了许多分支，如地下水动力学、矿床水文地质学、油田水文地质学等。中华人民共和国成立以来，兴建了新安江、乌江渡、索风营、构皮滩、水布垭、龙羊峡、天生桥二级、锦屏二级等大型水电站，进行了大量深入的水文地质勘察与研究工作，水文地质学得到了快速发展。

shuiwen dizhi cehui

水文地质测绘　(hydrogeology mapping)　对地下水和与其有关的各种地质现象的调查测量工作。在可溶岩地区称为岩溶水文地质测绘，是认识水文地质条件（地下水分布、埋藏、补排、动态及水化学特性等）的基本方法。其成果是为开发利用地下水和工程防渗处理、排水而进行勘探、试验的基本资料。水文地质测绘工作一般分准备工作、野外测绘及内业整理3个阶段进行。

准备工作　包括：①根据测绘目的，任务及地形、地质条件确定测绘范围和比例尺。②充分搜集和分析测区的水文、气象、地质、井泉、钻孔及航片、卫片等资料，对测区的地质构造和水文地质条件作初步的了解。③查勘测绘区的地形、交通条件和居民点的分布情况，而后编制测绘工作大纲。

野外测绘　主要内容包括：①工作方法。首先现场校对已搜集的资料，并据此布置测绘路线和观测点，选择测区典型地质剖面，编制地层柱状图，按测绘比例尺确定地层的填图单位，然后全面开展测绘工作，测绘比例尺大于1∶5000时测点需用仪器定位。在外业工作中随时整理草图和记录。②工作内容。对测区各时代地层的岩性、结构、厚度、产状分布和含水性进行全面观察与描述；观察研究褶皱形式与储水的关系、断层带含水及阻水的部位、裂隙密集带的富水程度；研究地貌与水文地质条件的相关性，特别在第四纪沉积物发育区尤为重要；了解地表水与地下水的关系，观察彼此间的补排现象，如无支流河段的水量突变、浑水段出现清水流、岸坡涌泉等现象；研究地植物和自然现象，如滑坡、沼泽化、盐渍化等的关系；测定地下水化学成分及水温等。

在岩溶地区开展的岩溶水文地质测绘，测绘内容除与一般岩石地区的测绘内容相同外，需着重对地表和地下岩溶现象、泉水、管道水、暗河、伏流等进行测绘和水力联系推测，是研究可溶地区水库和坝址区岩溶渗漏的基础资料。

内业整理　测绘外业工作结束后，要立即清理标本、照片、录像、素描图等原始资料，绘制各种图表，如汇总表、平面图、剖面图等，最后编写测绘说明或测绘报告。

shuiwen diaocha

水文调查　(hydrological investigation)　为弥补水文观测资料的不足，采用查访、考证、勘测等方式收集水文资料的工作。水文调查的主要内容有暴雨调查、洪水调查、枯水调查及用水调查等。广义的水文调查还包括流域、水系调查，泥沙来源调查，冰情调查及地下水调查等。

中国近代水文调查始于1915年的西江洪水调查。20世纪50年代以来中国普遍开展了主要江河的水文调查，查证了长江1870年及黄河1843年特大洪水。在枯水调查中发现了四川涪陵白鹤梁自唐朝广德二年（公元764年）以来的枯水位石刻，将长江枯水记录上延至距今1200余年前。1963年海河及1975年淮河两次特大洪水调查都取得系统资料，已整编刊印。中国主要江河洪水调查资料已于1988年汇编成《中国历史大洪水》出版。

暴雨调查　为复核大暴雨实测资料和延长暴雨资料系

列，需要对无资料地区或缺测早期和近年大暴雨地区进行调查，以便计算设计暴雨。调查的主要项目包括暴雨成因、暴雨中心位置、走向、暴雨量、强度、过程及笼罩面积等。（见暴雨调查）

洪水调查　为进一步提高设计洪水的计算精度，需查明历史上和近代未测到的大洪水发生年份、时间，调查洪水痕迹、涨落过程、河床冲淤变化，并推算洪峰流量，再结合历史文献的考证，分析论证其重现期。（见洪水调查）

枯水调查　为论证水电站的保证出力，分析工农业用水、城市生活用水和环境用水的保证率以及航运规划等，需要调查枯水期最低水位、最小流量、是否发生断流，并查明原因。（见枯水调查）

用水调查　进行水量平衡计算时，需要调查流域或坝址以上调出和引入水量及过程，水库蓄、泄水量和过程，工农业用水、城市生活用水及环境用水的水量及时间分配等。

shuiwen jisuan

水文计算

（hydrological computation）　根据实测及插补延长后的水文资料对径流、洪水、暴雨和固体径流等的有关量的分析与计算。目的在于预估长时期内可能出现的水文情势，为水资源开发利用的规划、设计、施工和运行提供水文设计数据。为了合理确定水电站的装机容量和发电量等基本参数，必须通过水文计算预估可能提供的水量及水能蕴藏量；为保证水利水电工程防洪安全，在规划设计和运行时，需要估算当地在未来运行时可能发生的洪水情况，以便拟定防洪设计方案，确保工程的安全运行。水文计算不可能确切预报出工程建成后一定时期的水文特征值变化过程，只能估算其出现的概率和超过设计标准的风险。

主要内容　包括径流计算、设计洪水计算、设计暴雨计算、固体径流计算等方面。

（1）径流计算。计算通过河流某断面符合设计标准的全年和分时段径流量及多年、年、月径流系列。径流计算主要包括径流特性分析、径流系列还原计算及插补延长、径流代表性分析和设计年径流计算等。当设计流域有冰雪融水补给或位于岩溶地区时，径流计算应考虑其影响。

（2）设计洪水计算。计算符合某一地点指定防洪设计标准的洪水数值。主要有设计洪峰流量、不同时段的设计洪量和设计洪水过程线、入库设计洪水、设计洪水的地区组成分析计算、分期设计洪水及支沟设计洪水计算等。

（3）设计暴雨计算。由暴雨资料推求设计洪水时，需要推求符合设计标准的设计暴雨，进而推求设计洪水。包括各种历时的设计雨量及其时程分配和地区分布；对特别重要的工程，还应估算当地的可能最大暴雨，供推算可能最大洪水用。

（4）固体径流计算。固体径流指水流挟带的悬移质泥沙和推移质泥沙及其所附着的污染物。主要计算它们的多年平均值及其在年内的分配情况，为研究水库淤积和下游河道冲淤及水质变化提供依据。

（5）其他水文计算。为工程设计需要，分析特定河段和断面的水位流量关系。北方河流要估算水工建筑物施工和运行时期可能出现的河流冰情；在感潮河段，要求确定设计最高、最低潮水位和潮型。

基本方法　主要是根据长期水文过程的随机性，应用概率论和数理统计的原理和方法，通过对实测水文资料作统计分析，估算相应指定设计频率的水文特征值（如年最大洪峰流量，不同时段洪量，年、月、日平均流量等）。为适应不同的水文资料条件，即有较长实测水文资料和短缺实测水文资料，可以采用不同的计算方法。

有较长实测水文资料时，可直接采用频率分析方法计算，具体步骤为：①收集、审查所需的基本水文资料；②对水文特征值系列进行频率分析并求出符合设计标准的水文特征值；③选择符合设计要求的时空分布作为典型，按设计值放大或缩小，求得设计条件下的水文特征值及其时空分布；④计算成果合理性分析论证。

实测水文资料短缺时，利用水文现象之间的联系，可采用不同方法展延资料。常用的方法有：①相关分析法。建立水文变量之间的相关关系，利用观测系列较长的参考资料以延长观测系列较短的水文资料。②地理插值及水文比拟法。依据水文现象在地理上的分布规律，由水文特征值等值线图或水文特征值与其他地理要素之间的经验关系，求得工程设计所需要的设计水文特征值。也可采用水文比拟的方法，把水文特性相似流域上的水文特征值、统计参数或典型时空分布，直接或经过修正移到无资料的设计流域，作为设计依据。此外要充分利用调查到的历史特大暴雨、特大洪水资料，这对提高计算成果的可靠性有重要的作用。上述各种方法适用范围没有明确的界线，相对于频率的分析要求，现有的水文资料不够充分时，应当采用各种途径分析论证，合理选用设计成果。

参考书目

刘光文．水文分析与计算．北京：水利电力出版社，1989.

詹道江，徐向阳，陈元芳．工程水文学．北京：中国水利水电出版社，2010.

shuiwen pinlü fenxi

水文频率分析

（hydrological frequency analysis）　根据水文观测资料组成的样本系列，分析水文变量与出现频率（或重现期）之间的定量关系。目的是为水利水电工程设计提供所需的具有频率含义的设计水文数据，是水文计算工作中的重要组成部分。水文频率分析的主要内容为选择频率曲线的线型和确定频率曲线的统计参数，从而确定水文设计成果。

频率曲线的线型　把水文变量和频率表达成一定的数字关系式，绘制成图形即为频率曲线。其常用的线型有皮尔逊Ⅲ型（P-Ⅲ）分布曲线（美国）、耿贝尔分布曲线（法国）、对数皮尔逊Ⅲ型分布曲线（美国）等。多年分析成果证明，皮尔逊Ⅲ型分布曲线是一种适应性较好的线型。为了便于在相同的基础上进行地区综合比较，中国在水利水电工程水文计算规范中规定，除特殊情况外，一般采用皮尔逊Ⅲ型分布曲线。其数学表达式为

$$P=\int_{x}^{\infty}\frac{\left(\dfrac{2}{\overline{X}C_{v}C_{s}}\right)^{\frac{4}{C_{s}^{2}}}}{\Gamma\left(\dfrac{4}{C_{s}^{2}}\right)}x^{\left(\frac{4}{C_{s}^{2}}-1\right)}\,\mathrm{e}^{\frac{-2}{\overline{X}C_{v}C_{s}}}\mathrm{d}x$$

式中 $\overline{X}$ 为数学期望值；C_v 为离差系数，表征概率分布的离散程度；C_s 为偏差系数，表征概率分布对称性的程度和方向；Γ 为伽玛函数。水文变量的概率分布特征 $\overline{X}$、C_v、C_s，一般是根据样本的经验频率分布通过统计分析得出的，习惯上称为统计参数。为便于计算皮尔逊Ⅲ型曲线已制成专用的数字表，可根据统计参数的数值查得曲线的坐标值。

频率曲线统计参数的确定　参数的估算方法常用的有适线法、矩法、概率权重矩法、线性矩法以及权函数法等。中国主要采用适线法，按下列步骤进行。

（1）参数初估值。根据水文系列，一般用矩法公式初步计算各统计参数值。计算公式如下

$$\overline{X}=\frac{\sum x_i}{n}$$

$$C_v=\frac{\sigma}{\overline{X}}=\sqrt{\frac{\sum(x_i-\overline{X})^2}{(n-1)\overline{X}^2}}$$

$$C_s=\frac{n\sum(x_i-\overline{X})^3}{(n-1)(n-2)\overline{X}^3C_v^3}$$

式中 x_i 为系列变量（$i=1, 2, 3, \cdots, n$）；σ 为均方差；n 为系列项数；其余符号含义同上。

（2）适线。根据初估参数值，用适线的方法调整计算参数，其经验频率 P_m 采用数学期望公式计算

$$P_m=\frac{m}{n+1}\quad(m=1,2,\cdots,n)$$

最后取用拟合较合理的频率曲线及其统计参数。适线的方法有目估适线法和优化适线法。目估适线法以目测曲线与经验频率点据拟合较好时为准；优化适线法常采用一定形式的目标函数，使其最小为准，较多采用离差平方和最小或离差绝对值之和最小等。

（3）适线成果合理性检查。现有水文观测资料的时期一般较短，为防止因资料代表性不够或计算方法的某些不当而带来差误，需要对适线成果在时间上（单站各长短时段）和空间上（情况相似的地区）作合理性检查。例如：相同频率短时段的水文值不能大于长时段的水文值；相邻站同类水文系列的统计参数不能相差太大以及是否符合地区变化规律等。

通过参数初估、适线和综合对比分析，可得到比较合适的频率曲线及其统计参数。

参考书目

金光炎．水文统计计算．北京：水利出版社，1980．

shuiwenxue

水文学

（hydrology）　研究地球大气层、地表及地壳内水的分布、运动和变化规律，以及水与环境相互作用的学科，属于地球物理科学范畴。通过测验、分析计算和模拟，预报自然界中水量和水质的变化和发展，为开发利用水资源、控制洪水和保护水环境等方面提供科学依据。

水文循环　地球上的水在太阳辐射能和地球引力场的作用下，通过蒸发、水汽输送、降水、入渗和径流等过程不断周而复始转化的现象。水文循环由一系列复杂的过程和路径组成，见图。水从海洋和陆地蒸发形成大气中的水汽，水汽被气流抬升和携带输送到高空和各地，在适当条件下凝结，以雨、雪、雹等形式降落到海洋或陆地上。陆地上的降水一部分被植物截留；另一部分沿地面流动形成地表径流，或渗入地下补给土壤水和地下水，形成壤中流或地下径流。地表径流、壤中流和地下径流汇入河流，注入海洋或内陆湖泊，完成全球的水文循环。水文循环中水的存在、运动、变化统称为水文现象。自然界的水文现象受太阳辐射、地球公转、大气环流、气候、自然地理和环境条件等众多因素的综合影响。这些因素在时间上和空间上不断变化并相互影响，致使水文现象具有周期性、随机性和地区性的特点。



水文循环示意图

20 世纪以来，人类活动对水文现象的影响日益明显。人们修建大型水库和灌区工程、跨流域引水工程以及大面积的水土保持工作，改变了天然径流、洪水和输沙过程。工业高速发展，大量未经处理的废水排入江河，污染了水质。大规模砍伐森林、开矿和修路破坏植被，增加了水土流失。

学科内容　水文学与气象学、海洋学、地质学、自然地理学等学科关系密切。广义的水文学可分为水文气象学、海洋水文学和陆地水文学。水文气象学主要研究大气中水汽的变化规律，包括大气中的水循环和水量平衡，以蒸发、凝结、降水为主要方式的大气与下垫面的水分交换，是水文学与气象学的边缘学科。海洋水文学主要研究海洋的水文现象，包括波浪、潮汐和海流等，属海洋学的内容之一。陆地水文学主要研究陆地上各种水体的水文现象和运动规律。随着生产发展的需要和研究工作的深入，已形成河流水文学、湖泊水文学、冰川水文学、地下水水文学等分支。陆地水文学中直接为工业、农业、交通等生产部门服务的内容称为应用水文学。狭义的水文学通常指陆地水文学和应用水文学。

工程建设中不断提出的课题和需求，促进了水文学的发展，逐渐形成一门应用水文学知识于工程建设的学科——工程水文学，作为应用水文学的一个分支，主要研究与工程规划、设计、施工和运行有关的水文问题。主要内容有：①水文测验。利用水尺或自记水位计、流速仪、泥沙采样器、测验缆道或测船等仪器和手段，按水文测验规范要求测量水位、流量、泥沙和水质等资料，并经过资料整编刊印，以备工程设计应用。②水文预报。在研究水文规律的基础上，根据上游水文站和雨量站前期和现时或即将发生的有关信息，对未来几小时或几天水文现象的变化进行预测，为水电站施工、运行及河湖防汛服务。③水文计算。按照工程建设的要求对水文资料进行分析计算，为工程规划、设计、施工和运行提供水文数据和设计成果。水文计算的基本内容包括径流计算、设计暴雨、设计洪水和年输沙量等。

研究方法　概括为：①成因分析法。即以收集水文站网

的大量实测资料及室内试验资料为基础，研究水文现象的形成过程、物理机理和相互关系，建立水文现象与影响因素的定量关系或水文模型。②数理统计法。水文现象兼有确定性和随机性，可以把某些水文现象看作随机事件，用概率论和数理统计的原理和方法，对某些水文现象进行频率分析，推求各种频率（或重现期）的水文数据。③地区分析法。气候与自然地理条件具有地区性分布的特点，水文现象也有一定程度的地区相似性，因此可研究水文要素分类和分区的特征值或建立区域性经验公式，或绘制各种特征值等值线图和分区图。

简史及发展　为了战胜洪水灾害，人类很早就注意对水文现象的考察和研究。早在4000多年前，大禹治水采用疏导方针，说明已认识“水流就下”的水文规律。秦朝李冰已在都江堰设“石人”观测水位。水文发展成为一个学科是从15世纪以后欧洲人发明并应用水文仪器为标志。雨量计、蒸发器和流速仪先后问世，使水文观测进入了科学定量的阶段。1674年P. 佩罗（P. Perrault）提出水量平衡概念，逐渐发展和形成近代水文学理论。20世纪，特别是第一次世界大战后，大量兴起的防洪、灌溉、水力发电、交通工程，提出了越来越多的水文课题，先后发展了单位线、频率分析和下渗理论等，使水文研究逐渐理论化和系统化。

20世纪50年代以来，由于经济发展和人口增长，人类对水资源的需求急剧提高。供水量不足和水质恶化促使社会各界越来越重视水资源保护。现代科技的发展，如卫星、移动通信、计算机等，促进了水文信息的采集、传输、存储和检索工作的发展。水文观测手段的改进、水文资料数量的扩大和精度的提高，加强了水文研究的基础。计算机的应用，使水文分析计算的功能和速度有了很大提高，为水文科学发展创造了条件。人类活动影响的加剧，在很大程度上改变了自然环境和生态系统，水文学研究领域发展和形成一些交叉学科和边缘学科，如环境水文学、随机水文学及都市水文学等，从宏观上全面地评价、分析和控制各种人类活动。

shuiwen yubao

水文预报

（hydrological forecasting）　根据前期和现时或即将发生的水文、气象等信息，对某一水体、地区或河道断面未来一定时段内水文状态作出的定性或定量的预测。水文预报属于应用水文学，在防汛、抗旱、水资源开发利用、国民经济建设和国防等领域均有广泛的应用。

水文预报主要以水文基本规律、水文模型研究为基础，结合生产实际的需要，构成具体的预报方案。水文预报方案是作业预报的基本依据。开展水文预报，需先编制预报方案，并对方案进行精度的评定和检验，按照GB/T 22482—2008《水文情报预报规范》精度等级划分标准，将预报方案划分为甲、乙、丙三等，其中甲、乙级预报方案可用于发布正式预报，丙级预报方案可用于参考性预报，丙级以下预报方案，只能用于参考性估报。

水文预报按预见期的长短划分，主要包括短期、中期、长期预报。自发布预报的时间至预报的水文现象出现的间隔时间为有效预见期。对于短期、中期、长期水文预报尚无统一的规定，并且对于不同的预报内容也有不同的规定，通常短期的洪水预报预见期小于72h，中期水文预报预见期为3～15d，长期水文预报预见期为15d以上一年以内。对于预见期在1年以上的，如较大范围的旱涝、流域的丰枯趋势预报等则称为超长期水文预报。

水文预报工作主要通过建设水情自动测报系统实现对水文信息的自动实时收集和处理，并完成水情作业预报。中国大中型河流及水利水电工程普遍建设有水情自动测报系统。

水文预报按对象划分，主要包括洪水预报、枯水预报、旱情预报、冰情预报、台风暴潮预报、水质预报、泥沙预报等。

洪水预报　为防洪度汛中一项重要的非工程措施，在水文预报中应用最为广泛。通常根据河道洪水形成和运动规律，由河道上游断面的洪水水位和流量过程预报下游断面的洪水水位和流量过程，或根据流域降雨径流关系，通过产、汇流计算对流域出口断面流量过程进行预报。预报内容包括最大洪峰流量（水位）及其出现时间、洪水涨落过程、洪水总量等。（见洪水预报）

枯水预报　为合理制订电站发电、农业灌溉、河道航运、城市用水、堤防岁修等计划，需进行枯水径流预报。通常是在分析研究流域前期蓄水情况和河川退水规律的基础上，采取退水趋势分析和枯季降雨径流关系等方法对枯季径流总量、流量和水位变化过程等进行预测。

旱情预报　为了减少干旱对工农业生产和人民生活造成的影响，需要根据某一区域农田土壤墒情、降水量、蒸发量、地表水及地下水可用量、城乡需水量等影响因素分析，对该区域未来（或某一时段）干旱的发生、发展趋势、影响范围、受旱程度等的预测预报。

冰情预报　冬季结冰的河流、湖泊、水库在结冰、封冻和解冻过程中，可能对航运、工程施工、水库运行等产生影响，也可能因发生冰塞、冰坝壅水而造成灾害，需开展冰情预报。封冻期预报项目主要包括流凌开始日期、封冻日期、冰厚及冰盖承载能力等，解冻期预报项目主要包括解冻形式（文开河或武开河）、解冻日期、解冻时最高水位、最大流量及出现日期等。

台风暴潮预报　根据台风、气压、海浪、潮汐的变化规律，结合海岸地形因素，预报最高潮位及出现时间，为沿海城市及农村防洪服务。

水质预报　根据水流运动规律，以及污染物在水体中的稀释自净分析计算，对未来一定时间内水体水质状况及变化情势的预测。水质预报对实施水资源优化调度具有重要意义。

泥沙预报　为了掌握多泥沙河流的沙情变化，需进行泥沙预报。通常利用河流水、沙关系，在流量预报的基础上进行泥沙量预报。对于多沙河流上的水库，为保持有效库容，根据上游来沙量预报，适时开展排沙调度，是水库减少泥沙淤积的有效措施。

shuiwenzhanwang

水文站网

（hydrological network）　在一定地区或流域内，按一定原则，用一定数量的各类水文测站所组成的水文资料收集系统。设置水文站网的目的是为区域的环境保护、水资源开发利用，以及科学研究和防汛抗旱等公共需要提供基本水文资料和实时水文情报。

站网发展　中国在春秋时代已有各郡县向中央报雨的制

度，说明当时已开始观测降雨。明代，沿黄河已有观察、传递水情的制度。从1865年起，汉口开始有连续水文记录。至1937年，有水文站403处（不包括台湾省数据，下同）。自1956年开始，中国进行了4次水文站网的规划和调整，基本上建成布局合理、监测项目比较齐全的各类水文站网。2010年中国基本水文测站情况见表1。

表1 2010年中国基本水文测站情况

分类	水文站	水位站	雨量站	水质站	地下水观测站	蒸发站	实验站	水情拍报站	水质实验站
数量	3193	1467	17245	6535	12991	12	57	12786	727

数据来源：中国水利部水文局《中国水文情况年报》。

世界气象组织（World Meteorological Organization，WMO）建议容许最稀水文站网密度水平是：一般平原区每站面积1000～2500km²，山区每站面积300～1000km²，中国为3000km²/站，水文站网密度接近世界平均水平（见表2），但在国内分布不均匀，东部比较接近发达国家站网密度，中、西部低于世界平均水平。

表2 世界水文站网密度统计

地　区	欧洲	北美	澳洲及大洋洲	亚洲	全世界	中国
密度（km²/站）	1750	1000	2600	3600	2650	3000

测站分类　水文测站按性质分为基本站和专用站。基本站由国家水文部门负责规划建立和管理，基本站网要求以最经济的测站数目，能达到内查任何地点的特征值。专用站为科学研究、工程建设、管理运行等特定目的而设，能在提高内插精度和解决某一实用问题上弥补基本站网的不足。站网设计内容包括：①确定水文分区；②确定站网密度；③选择站址；④明确设站年限；⑤各类站网协调配套。

站网分类　按测验项目分雨量站网、蒸发站网、流量站网、水位站网、泥沙站网、水质站网和地下水观测站网几类。

（1）雨量站网。观测降水（包括降雪、积雪）的站网，用以反映降水量的空间变化，补充流量资料的不足和作为水位流量预报的依据。为连续记录降水过程，雨量站网中要配备一定数量的自记雨量计。

（2）蒸发站网。用国家规定的标准蒸发器观测水面蒸发量的站网。蒸发量是水量平衡计算的重要因素之一。

（3）流量站网。由基本水文站组成，是水文站网中最重要的一种。流量资料是解决水资源开发利用和大部分水文问题的基础。流量资料由连续的水位记录和一定数量的实测流量数据，通过建立水位-流量关系曲线推求，因此流量和水位测验应同时进行。站网设计时按大、中、小河分别布站。大河设控制站，中等河流设区域代表站，小河流设小河站。

（4）水位站网。由水位站和观测水位的其他水文测站组成的站网。水位具有为水利、水运、防洪、防涝提供单独使用价值的资料。

（5）泥沙站网。悬移质泥沙、推移质泥沙是估计河床变化过程、确定入海沙量、研究水库和渠道等水利水电工程冲淤变化和制定排沙减淤措施的基本资料。一般按不同水文分区在流量站网中选择一定比例的站观测泥沙。在黄河及其他严重水土流失区，每个流量站都观测泥沙。

（6）水质站网。了解河流、水库天然水化学特性和监测水质污染情况的站网。按土壤、地层岩性和水文条件，在干流控制河段、重点城市、工矿企业集中区和出入国境把口处等河段布设测站，一般和流量站结合。

（7）地下水观测站网。动态监测一定区域内地下水位变化过程的观测站网。地下水是水资源的重要组成部分，是战略性资源的主要部分，在保障城乡居民生活、支持经济建设和维护生态平衡等方面具有重要作用。

shuiwen ziliao

水文资料　（hydrological data）　水文站通过测验获得的各种水文要素的实测基本资料和由水文原始记录整理汇编成的水文年鉴。包括水位、流量、比降、河道糙率、纵横断面、泥沙、水温、降水、蒸发、水质、冰情等。广义的水文资料还包括经整理分析后的水文特征值统计、水文手册、水文图集以及有关洪枯水调查资料和记载历代洪涝水情的文献资料等。

水文资料是工业、农业、交通、国防和科研等各部门广泛应用的一种基本资料。如水资源的评价、河流的开发利用、江河防汛、航运、农田灌溉、城市供水等都要以水文资料作为依据。

水文资料具有特殊的要求和条件：①获得水文资料的站网布局要合理，这样才能取得一条河流或一个流域的具有代表性的完整资料；②资料系列要长期连续，这样才能反映出一条河流水文特征的变化规律；③实测的数据要力求准确，符合规定的精度，这样才有实用价值。

在水电站设计、建设及运行过程中，水文资料是重要基础资料。水文计算规范中，对水文资料的搜集、整理和复查都有明确规定，要求对资料的全面情况作深入了解，对水文观测资料和整编成果应进行重点复查，对资料的质量做出评价。

shuixi

水系　（river system）　汇集、输送和排泄径流，具有共同出口的水道体系。由地表水及地下水分水线包围的汇集降水和来水到本水系的地域称流域，其面积称为水系的流域面积，亦称集水面积。当地下水分水线不易确定时，常以地表水的集水区分界。河流是指沿地形的低凹带形成的输水河床及其水流，它是水系的输水通道。湖泊是指天然地形形成的可蓄水的洼地及其储存的水体，起汇集并调节水系径流的作用。

水系由干流、各级支流及与干支流相通的湖泊、沼泽、水库等组成。水系出口的河流称本水系干流，注入干流的河流及其各分支河流称为支流。干支流一般呈树枝状，也有多条支流汇入同一湖泊后再注入干流的。支流的分级一般把直接注入干流的河流称为一级支流，注入一级支流的河流称为二级支流，以此类推。在天然情况下，相邻水系之间没有互通的河道。

水系分类　水系可分为入海水系和内陆水系。入海水系的出口注入海洋；内陆水系的出口或注入内陆湖泊或其河道尾闾由于水流逐渐枯竭而消失。入海水系和尾闾逐渐消失的内陆水系通常以其干流的名称作为水系的名称，例如中国的长江水系、美国的密西西比河（Mississippi）水系、中国新疆维吾尔自治区的塔里木河水系等。而汇入内陆湖泊的水系常以内陆湖泊的名称命名，例如中国青海省的青海湖水系。入海水系又以其所注入的海洋名称划分归属，例如凡注入太平洋的所有水系统称太平洋水系。

中国主要水系　中国各入海水系分别属于太平洋、印度洋和北冰洋水系。长江、黄河、珠江、黑龙江、海河、滦河、辽河、鸭绿江、图们江、淮河、钱塘江、闽江、韩江、澜沧江、红河等属太平洋水系；雅鲁藏布江、怒江等属印度洋水系；额尔齐斯河属北冰洋水系。中国入海水系的流域面积约占全国总面积的2/3。中国内陆水系主要有塔里木河、伊犁河、叶尔羌河、黑河等。中国入海水系中的湖泊均为淡水湖，主要有长江水系的鄱阳湖、洞庭湖、太湖等，黄河水系的扎陵湖、鄂陵湖以及位于中国和俄罗斯两国边界属于黑龙江水系的兴凯湖等。内陆湖多为咸水湖。中国主要的内陆湖有青海湖、纳木错等。

世界主要水系　世界上流域面积大于100万km^2的水系有：亚洲的长江（Changjiang river）、叶尼塞（Yenisei）河、鄂毕（Ob）河、黑龙江（Heilongjiang river）、勒拿（Lena）河、额尔齐斯（Irtysh）河、印度（Indus）河、恒河（Ganges）；欧洲的伏尔加（Volga）河；非洲的尼罗（Nile）河、扎伊尔（Zaire）河［亦称刚果（Congo）河］、尼日尔（Niger）河、赞比西（Zambezi）河、奥兰治（Orange）河；大洋洲的墨累（Murray）河；北美洲的密西西比（Mississippi）河、马更些（Mackenzie）河、圣劳伦斯河（St. Lawrence）、纳尔逊（Nelson）河；南美洲的亚马孙（Amazonas）河、拉普拉塔（La Plata）河。

世界最长的河流为尼罗河，长6670km；中国的长江长6300km，居世界第3位；流域面积和径流量最大的为亚马孙河，流域面积为691.5万km^2，年径流量为69300亿m^3。

shuixia baopo

水下爆破　(underwater blasting)

在水中、水底或水下的固体介质内进行的爆破技术。广泛应用于港口码头、船坞建设、航道疏浚、水利水电、道路桥梁、水下管道埋设、水下清淤筑堤、水下爆夯等工程。水下爆破与陆地爆破的设计原理基本相同，但施工比较复杂，炸药及起爆装置抗压抗水要求高。水是一种近乎不可压缩的液体，被爆介质受到垂直和测向水压力的作用，对爆破效果产生一定影响。在同等炸药量情况下，水下爆破所产生的爆震波比地面大，而水冲击波又是水下爆破中特有的问题，其波阵面上的压力，对附近水中建筑物和船舶的破坏更为突出。

爆破方法　按照工程目的、药室形状和位置的不同，水下爆破主要有水下裸露爆破、水下钻孔爆破、水下药壶爆破、水下洞室爆破、水下软基处理爆破等。①水下裸露爆破：又称水下表面爆破法。这种方法设备简单，操作容易，只在被爆介质表面敷贴防水药包即可起爆，常用于通航河道中炸除暗礁、清理沉积障碍及松动胶结紧密的砂卵石层等工程，单位耗药量大，爆破效率低，水冲击波破坏力大，一次爆深受限制。②水下钻孔爆破：与陆上钻孔爆破基本相同，只是需在船上或搭设的平台上定位钻孔，是水下爆破的主要施工方法。水下成孔后，需用护孔管保护，以免泥沙堵塞。这种方法的单位耗药量小、效果好，但水下钻孔定位比较困难，精度难以检查。③水下药壶爆破：又称水下扩大炮孔法。爆炸力集中，钻孔量少，但只适用于岩体完整且覆盖层较薄的特大孤石、礁石或河床基岩较高的岩层，炸除深度一般小于6m。④水下洞室爆破：适用于岸边水下开挖量较大且有抛掷堆积条件的工程，如围堰水下部分爆破拆除、引水洞进口岩塞爆破等。⑤水下软基处理爆破：利用炸药的爆炸能量，以在软基中置换、固结及夯实为目的的爆破作业，是软基地基处理的新技术。

起爆方式　包括：①电力起爆。采用复式电爆网络，但不宜用铝（或铁）芯线作电爆网络导线，整个网络敷设后除量测导通电阻外，还要进行漏电量测。②导爆管起爆。具有抗静电、抗杂电、防水且网络连接简便等优点，已被广泛应用于水下爆破中，一般采用复式网络。③数码电子雷管起爆。多在湍急河流、浮游生物多的湖泊及风浪大的近海敷设网络有困难时采用，可用超声波或电磁波无线遥控起爆。该起爆方式精度和可靠性高，在中国长江三峡水利枢纽三期围堰拆除爆破中成功应用。

shuixia hunningtu shigong

水下混凝土施工　(underwater concrete construction)

将混凝土浇筑到水下指定部位的施工技术。常用于修筑围堰、混凝土防渗墙、桥墩基础以及水下建筑物的局部修补等工程。在水下浇筑混凝土时，为保持原有的水灰比，要防止外水进入混凝土拌合物内，还要防止水流的冲刷、扰动，以免混凝土产生分离或水泥砂浆流失，因此一般只适用于静水或流速较小的条件下。

常用的水下混凝土施工方法有直接浇灌法、导管法、压浆法和袋装法等，其中以导管法应用最广。

直接浇灌法　将搅拌好的混凝土直接浇灌在水下的方法。一般适合于水深较浅且对混凝土质量要求不高的部位。

导管法　将若干导管装置在浇筑部位，底部伸入水中，管底端接近地基。管顶部设有贮料斗，利用起重设备吊住并使其可以升降。开始浇筑时，管内有以铅丝吊住的球塞，先在导管中浇适量的水泥砂浆，然后在导管和贮料斗内均灌满混凝土拌合物。这时再剪断铅丝，使混凝土在自重作用下迅速排出球塞并进入水中。浇筑过程不要间断，要使导管内经常充满混凝土，并保持导管底口始终埋在已浇的混凝土内，埋入的深度一般不少于1m。如此连续浇筑，同时缓慢提升导管，直至结束。如需要浇筑的混凝土量较大，将导管法与混凝土泵结合使用，可以取得较好的效果。

压浆法　在水下清基、立模并封密接缝后，用预填骨料压浆混凝土的方法进行浇筑。

袋装法　将混凝土拌合物装入麻袋或其他材料的袋子，依次沉放，堆筑在水中预定地点。日本曾采用一种水溶性薄膜的袋子，柔性较好，在水中溶化的时间稍长于混凝土的硬

化时间，有助于提高堆筑体的整体性。浇筑水下混凝土时，在清基、立模、堆砌等工作中需有潜水员配合作业。

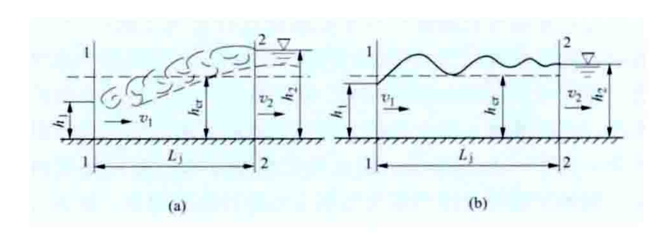
shuiyue

水跃 (hydraulic jump) 明渠水流由急流向缓流过渡时，自由水面出现阶跃旋滚或波状的明渠急变流态。水跃的基本形态是稳定旋滚或波状水面，见图。旋滚使水体掺混，卷入空气，使水流的部分机械能转化为热能而耗散，因此，泄水建筑物常利用水跃作为消能的主要手段之一。

实际工程中的水跃形态随消能结构物形式和运行条件的不同，可以是面流旋滚、底流旋滚、戽流等；随下游水深的变化，又可形成远驱水跃、临界水跃、淹没水跃等；还有一些特殊形式的水跃，如斜坡上的水跃、平面扩散的三元水跃、管道内的有压水跃等。

水跃的水力因素是：跃前和跃后水深 h_1 和 h_2（亦称水跃的共轭水深），相应的断面平均流速 v_1 和 v_2，见图，其中 h_{cr} 为临界水深。跃后与跃前水深之差称为水跃高度

$$a=h_2-h_1$$



水跃示意图

(a) 稳定水跃；(b) 波状水跃

水跃的基本方程是恒定总流的动量方程，对于平底棱柱形明渠，水跃方程为

$$\frac{\alpha_2 Q^2}{gA_2}+A_2 y_{c2}=\frac{\alpha_1 Q^2}{gA_1}+A_1 y_{c1}$$

式中 Q 为明渠总流量；A_1 和 A_2 分别为跃前和跃后的过水断面积；y_c 为过水断面重心距水面的深度。一般假定流速分布不均匀系数 $\alpha_1=\alpha_2=\alpha_0$。上列水跃方程的含义是：跃前、跃后两断面上单位时间流入的动量和断面上动水总压力之和保持不变。

对于平底矩形断面的明渠，共轭水深的关系为

$$h_2=\frac{h_1}{2}(\sqrt{1+8Fr_1^2}-1)$$

式中以跃前断面弗劳德 (Froude) 数 $Fr_1=\frac{v_1}{\sqrt{gh_1}}$ 为水跃特征参数，则水跃长度 L_j 的经验关系式为

$$L_j=k(Fr_1-1)^m$$

或

$$L_j=c(h_2-h_1)$$

式中，系数一般用 $k=10.8$，指数 $m=0.93$，$c=\frac{10}{Fr_1^{0.32}}$。

水跃的消能率因水跃形态、旋滚状况而不同，通常用水跃消能系数 K_j 表示，见表。

$$K_j=\frac{(\sqrt{1+8Fr_1^2}-3)^3}{8\sqrt{1+8Fr_1^2}(2+Fr_1^2)}$$

水跃消能系数表

Fr_1	水跃形态	旋滚状况	K_j
1～1.7	波状水跃	没有旋滚	0～0.05
1.7～2.5	弱水跃	许多小旋滚	0.05～0.18
2.5～4.5	摆动水跃	旋滚不稳定	0.18～0.44
4.4～9	稳定水跃	稳定旋滚	0.44～0.70
>9	强水跃	大旋滚	>0.70

shuizhi fenxi shiyan

水质分析试验 (test for water quality analysis) 运用物理学、化学、生物学等方法，对水质样品的物理化学性质、成分、形态等进行定性和定量分析，提出水质数据。按试验目的分为常规分析、专门分析及特殊分析。各测定项目见表。

地下水水质分析项目表

水质分析种类		水质分析项目
常规分析	简分析	色、水温、气味、口味、浑浊度或透明度、pH 值、游离二氧化碳、总矿化度、总碱度、总硬度、钙、镁、钠、钾、氯离子、硫酸根、重碳酸根
	全分析	色、水温、气味、口味、浑浊度或透明度、pH 值、游离二氧化碳、总矿化度、总碱度、总硬度、暂时硬度、永久硬度、负硬度、可溶性二氧化硅、耗氧量、氯离子、硫酸根、硝酸根、亚硝酸根及重碳酸根、铵、钙、镁、三价铁、二价铁、钾、钠、硅酸、硼等
专门分析	水文地球化学分析	铜、铅、锌、铁、锰、镍、钴等微量金属组分，^1H、^3H、^{18}O、^{14}C 等同位素及溶解和逸出的氧、氮、一氧化碳、二氧化碳、甲烷、硫化氢、氩、氦等气体或稀有气体成分
	毒理学分析	汞、镉、铬、砷、硒、氰化物、挥发酚类、苯并（α）芘、三氯甲烷、四氯化碳、有机氯、有机磷等
	细菌学分析	总大肠菌群、细菌总数
特殊分析	混凝土侵蚀性分析	氢离子浓度（pH 值）、游离碳酸含量、侵蚀性二氧化碳含量、重碳酸盐碱度（HCO_3^- 离子）、氯离子含量、硫酸根离子含量、钙离子含量、镁离子含量、溶解固形物、钠离子和钾离子含量、硫化氢含量、氧化能力

基本分析方法 根据样品待测组分的含量及分析精度要求选择分析检验方法。常用的有：①滴定分析法。将已知浓度的标准溶液滴加到被测成分的溶液中直至所加溶液物质的量按化学计量关系恰好反应完全，根据所加标准溶液的浓度和所消耗的体积，计算出被测物质含量的分析方法。由于这种测定方法是以测量溶液体积为基础，故又称容量分析法。多用于测定 Ca^{2+}、Mg^{2+}、Cl^-、SO_4^{2-}、碱度、硬度等。②比色法。以生成有色化合物的显色反应为基础，通过比较或测量有色物质溶液颜色深度来确定待测组分含量的方法，常用于测定 Fe^{2+}、Fe^{3+}、NH^{4+}、NO_3^-、NO_2^- 等。③离子选择电极法。利用离子选择电极对特定离子产生选择性响应原理，通过简单的电位测量仪直接测定或指示溶液中离子活度

的电位测量方法，主要用于测定 F^-、NO_3^-、CN^-。④原子吸收光谱法。将待测元素的溶液在高温下进行原子化变成原子蒸气，由一束锐线辐射穿过一定厚度的原子蒸气，光的一部分被原子蒸气中的基态原子吸收，透射光经单色器分光，测量减弱后的光强度，利用吸光度与火焰中原子浓度成正比的关系求得待测元素的浓度，主要用于测定 Ca、Mg、Cu、Pb、Zn、Cd、Fe、Mn、Ni、Co、Cr、K、Na、Li、Rb、Cs、Sr 等。

专门分析和特殊分析，需根据相关行业技术标准进行试验。

分析结果表示　水质分析结果用各种形式的指标值及化学表达式来表示，即离子含量、分子含量、综合指标（pH 值、酸碱度、硬度、矿化度、分子式）。

shuiziyuan zonghe liyong

水资源综合利用　(comprehensive utilization of water resources)　以获得经济、社会和环境总体效益最优为原则，通过工程措施合理调配河流的流量和水位，多目标地开发利用水资源。水资源综合利用对水资源缺乏或水资源时空分布不符合要求的地区或国家，可以缓解需要与可能不一致的矛盾，兼顾各方要求，总体上降低投资和运行费用。

水资源利用包括兴利和除害两方面。兴利有水力发电、灌溉、供水、航运、漂木、水产养殖、美化景观、旅游等；除害有防洪、除涝、防凌等。

水资源综合利用的可能性　包括 3 个方面：

（1）水资源具有多方面的功能，如水力发电要利用水体所蕴有的能量；航运、水产养殖、旅游等要利用水资源形成有利的水域和水体；而灌溉和供水则需要消耗部分水量。经过合理调配，水的各种功能可以充分利用，实现一水多用。

（2）各部门对水资源利用往往有共同的要求，如建造水库既壅高水位，又调节径流。水库壅高水位可为水电站提供发电水头，使水体蕴有的能量集中为水电站利用；为航运可加大库区水深，扩大水域，改善库区通航条件，提高通航能力；为灌溉和供水提高取水高程，扩大供水范围；为水产养殖和旅游形成或扩大需要的水域面积和水体，改善水产养殖和旅游环境条件。水库调节径流，可储存丰水期多余的水量，转到枯水期利用，既为发电、航运、供水、灌溉等增大了枯水期可利用的水量，又可以减少洪涝灾害。只要合理调度水库，可使一库多用。

（3）发电、灌溉、供水、航运等部门都是国民经济整体中的一个组成部分，需要协调发展，所以国家或地区的国民经济发展要求综合利用水资源，以获得最佳的整体效益。

水力发电与其他部门需求不一致的情况及措施　各部门对水资源利用的要求既有互相一致的方面，又有可能不一致的方面。当水电站和其他部门对水量或水位的时空分配的要求不一致时，可以通过恰当地配置梯级水电站的水库位置和库容，合理选择水库参数，根据电力系统电源可互为补偿的条件而采取恰当的运行方式等措施，使矛盾得到缓解，或同时满足发电和其他部门的要求。

（1）水电站为电力系统调峰，使其下游河段日内流量不稳定。电力系统负荷高峰时水电站需多放水发电，负荷低谷时水电站需少放水发电，甚至不发电，从而使其下游河道流量和水位在一日内变化较大，而航运或供水部门要求河道昼夜流量相对平稳，于是出现部门间对流量日内时空分布要求不同的矛盾。对此，可采取在水电站下游建反调节水库的措施来解决。利用反调节水库把上级水电站放出的不均匀流量调节成较均匀的流量再下泄。没有反调节条件时可考虑水电站按各种制约设计运行方式，一方面在电力系统负荷高峰时期尽量发挥电站容量作用，另一方面电站最小下泄流量为航运等各种最低要求的大值，期间需考虑满足流量及上下游水位变幅的制约，以同时满足电力系统调峰和其他用水要求。

（2）发电和航运、灌溉等用水的要求在年内时空分布不同的矛盾。电力系统要求水电站在年内各月比较均衡地提供电量，而北方地区的航运分通航期和非通航期。通航期要求河道保持较大的流量，而非通航期对河道流量没有要求。灌溉也分灌溉期和非灌溉期，年内各月用水要求也不均衡。当存在这类矛盾时，可采取河流上下游水库联合调度的措施协调。其中一座水电站的水库按照航运、灌溉用水要求运行，灌溉期多发电，非灌溉期少发电，该水电站在年内不均匀供电的缺点再由其他水电站填平补齐，即在通航期或灌溉期少发电，其他时间多发电，以使两座或若干座水电站总发电量在年内各时期保持均衡。

（3）发电与其他部门在水库最低运行水位方面的矛盾。有时发电要求增大水库水位变幅，以提高水库调节径流能力，使水电站在枯水期多发电。航运为保持库区航道必要的水深，或者灌溉、供水为扩大供水范围而要求水库水位不低于某一高程。由于发电、航运和灌溉都可考虑替代措施解决，例如发电可考虑利用其他水电站进行补偿调节；航运可考虑适当的疏浚河道措施；灌溉可考虑部分扬水设施等方法弥补。因而可根据各方效益合理选择死水位及替代措施，兼顾各方面的要求。当库区淹没条件允许时，也可考虑提高正常蓄水位使各方要求都得到满足。

（4）引水式水电站引水口以下至水电站之间原河道流量减少，出现减水河段甚至出现脱水河段的矛盾。在航运、灌溉、供水、渔业用水要求较高而又没有其他经济合理的解决措施的河段，水力发电则尽量采用坝式开发而不采用引水式开发（见水电站）。若其他用水部门只需少量流量或可以另觅水源替代时，可在根据减水河段生态等需水论证的基础上，按经济原则选用引水式开发，并按论证要求保留一定下泄流量。

（5）在水资源利用中建设调节水库和水库淹没损失之间的矛盾。由于梯级水电站的水库可以联合调度，可考虑上游水电站的水库直接或间接为下游水电站调节径流的作用，所以可在较大范围内合理选择水库库址和库容规模，以减少水库淹没损失或避免某一河段的淹没，达到对自然环境不利影响最小而又满足各部门对径流调节的要求。

（6）兴利和防洪所需库容的矛盾。为重复利用水库库容的调节作用，水电站水库可在不同时期采用不同的运行方式以协调兴利和防洪所需库容的矛盾。在汛期，水库为兴利目的允许的最高蓄水位（即防洪限制水位）可低于正常蓄水位，以增加为防洪目的而设置的防洪库容。汛期以后，为兴利目的允许的水库最高蓄水位上升到正常蓄水位，相应增加了兴利所需的调节库容。这种运行方式重复利用处于防洪限制水位到正常蓄水位之间的库容，汛期用于防洪，非汛期用

于兴利，可协调防洪和兴利对库容要求的矛盾。

(7) 为弥补拦河坝截断河道对通航、漂木、鱼类生存等的不利影响，可采用设置不同类型的过船过木设施、鱼道等过鱼设施或另设增殖站等措施解决。

在某一河流或河段的水资源开发中，各综合利用部门的主次关系不同。在解决各部门间对水资源利用的要求有矛盾时，考虑各部门的主次关系，通过合理地协调各部门的要求，研究可能采取的各种替代技术措施，按总体效益最优为原则，确定水资源综合利用方案，并通过行政程序予以确认。

sikurong

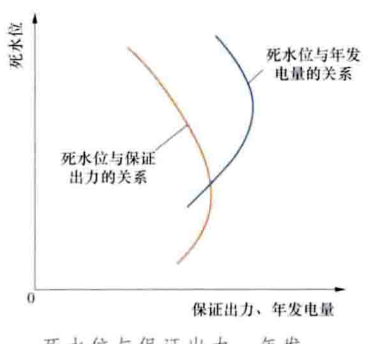
死库容 (dead storage capacity)　见死水位。

sishuiwei

死水位 (dead water level)　水库在正常运用情况下允许消落的最低水位。正常蓄水位至死水位的水位差称消落深度，与之相应的库容为调节库容，又名有效库容、兴利库容。死水位以下的库容为死库容。水库正常运行以外，遇特枯水时段或有其他特殊要求时而设置的水库最低水位为极限死水位。

水库运行中，水位消落到死水位的频率，取决于其调节性能及调节任务。日调节水电站，库水位消落到死水位的频率较多；年（季）调节水电站，库水位于每年的枯期末消落到死水位；多年调节水库，只在出现连续枯水年时，于枯水段末，库水位消落到死水位，一般年份的最低水位叫做年消落水位，高于死水位。

在水库正常蓄水位确定以后，水库的调节库容取决于死水位的高低。较低的死水位，水库调节库容较大，可相应提高调节流量，但相应降低了水电站的平均水头。死水位较高，消落深度不大时，水库死水位每降低1m增加的库容较大，相应增加的调节流量也较大，而平均水头的减小值较小，因而其调节时段的平均出力增加。当死水位降低到某一数值后，降低1m死水位所增加的调节流量较小，平均水头降低值较大，其调节时段平均出力将减小。对死水位而言，调节时段的平均出力有一个最大值。保证出力的最大值出现在较低的死水位，年发电量最大值出现于较高的死水位（见图）。此外，当死水位过低时，可能由于水轮机的过水能力限制而减小水电站的预想出力。因此，死水位的选择，必须兼顾保证出力、年发电量和电站的容量效益，进行技术经济比较。



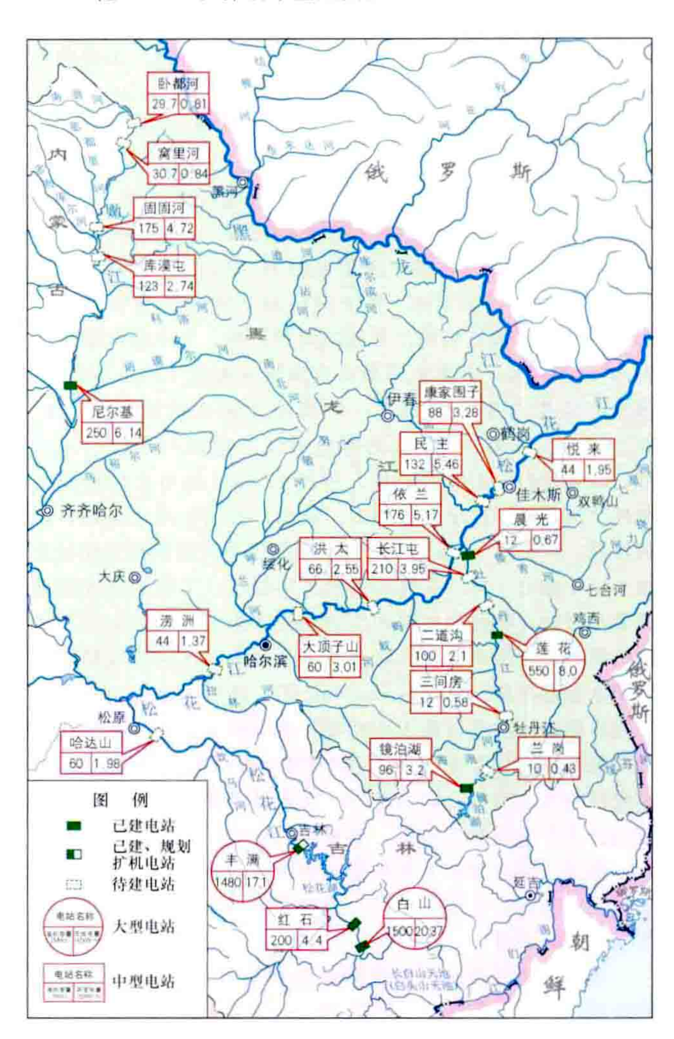
死水位与保证出力、年发电量的关系示意图

死水位的确定涉及的制约因素有：①综合利用部门的最低水位要求，如水库上游航道最小水深的要求；②水库泥沙淤积对最低死水位的限制；③水轮发电机组和闸门制造及运行等方面对最低水位的要求。

与水库最优死水位相应的消落深度，一般为水库壅水高度的20%～40%。承担梯级或跨流域补偿调节任务的水电站，其消落深度较大。调节性能较差的水电站，消落深度较小。

songhua jiang shuidian guihua

松花江水电规划 (hydropower development planning of Songhua River)　根据松辽水利委员会1991年编制的《松花江流域规划报告》，在嫩江干流布置卧都河、窝里河、固固河、库莫屯、尼尔基5座电站，装机规模608.4MW，多年平均年发电量15.25亿kW·h；在第二松花江干流布置白山、红石、丰满、哈达山4座电站，装机规模2764MW，多年平均年发电量47.07亿kW·h；在松花江干流布置涝洲、大顶子山、洪太、依兰、民主、康家围子、悦来7座水电站，装机规模610MW，多年平均年发电量22.79亿kW·h。梯级布置见图。



松花江干流（含嫩江、第二松花江干流）梯级水电站布置图及开发现状

松花江是黑龙江右岸最大支流，流域面积56.122万km^2，分南北两源，北源嫩江发源于大兴安岭伊勒呼里山，南源第二松花江发源于长白山天池，南北两源在吉林省松原市三岔河汇合后始称松花江，东流至同江注入黑龙江。嫩江流域面积29.85万km^2，河长1370km；第二松花江流域面

积 7.34 万 km^2，河长 958km，从河长和流域面积看，嫩江是松花江的主源。

松花江各河段的开发任务不同。①嫩江上游，即库莫屯以上河段，属山区性河流，发电是主要开发任务。规划布置卧都河、窝里河、固固河、库莫屯 4 级水电站，共利用水头 124m，总库容 137 亿 m^3，装机容量 358.4MW，多年平均年发电量 9.11 亿 kW·h。其中以固固河的地形地质条件较好，调节库容 63.67 亿 m^3，可进行多年调节。因距用电中心较远，淹没损失较大，尚未开发。②嫩江中下游由山区逐渐向丘陵过渡，到齐齐哈尔市以下为平原区。该区是松花江流域工农业发达地区，需要嫩江供水以满足工农业发展要求，并要求调节洪水，提高防洪标准。在该河段规划建设尼尔基水利枢纽，总库容为 86.12 亿 m^3，其中防洪库容 23.68 亿 m^3，可使齐齐哈尔市防洪标准由 50 年一遇提高到 100 年一遇，使齐齐哈尔以上的嫩江两岸地区防洪标准由 20 年一遇提高到 50 年一遇，使齐齐哈尔以下至三岔河口的嫩江两岸地区的防洪标准由 35 年一遇提高到 50 年一遇。工程将承担嫩江流域的调节任务，可补偿农业灌溉水量 16.46 亿 m^3，补偿工业及城市生活用水量 10.29 亿 m^3，同时向下游提供航运和水环境保护补偿水量 12.95 亿 m^3。③第二松花江丰满水电站以上河段穿行于长白山区，水量丰富，落差集中，是东北地区水能资源开发条件最好的河段，该河段开发任务以发电为主，兼顾防洪。规划有红石、白山、丰满 3 座电站，装机规模 2704MW，其中白山和丰满均具有季调节能力，主要承担第二松花江干流的防洪任务，当丰满水库发生 50 年一遇洪水，丰满水库最大放流量不超过 $4000m^3/s$；丰满水库发生百年一遇洪水，丰满水库最大放流量不超过 $5500m^3/s$。在第二松花江的源流漫江还建设有松山引水工程，即通过松山水库调节后，用长 12.6km 的引水洞引到支流松江河，松江河建设有小山、双沟、石龙 3 座水电站，装机规模 510MW，已投产发电。④丰满以下河段的开发任务是提高供水能力。规划布置哈达山水利枢纽，工程的开发建设任务是以向吉林西部生活和工农业供水为主，结合生态环境保护供水、防洪和发电等综合利用，并为向辽河流域缺水地区供水创造条件。总库容 30.08 亿 m^3，防洪库容 6.24 亿 m^3，可使松原市的防洪标准由 100 年一遇提高到 200 年一遇，规划灌溉面积 320 万亩，可向吉林省部分市镇提供 6.8 亿 m^3 城镇生活和工业用水、17.8 亿 m^3 农业灌溉用水。⑤松花江干流的开发任务是渠化河道，建设水利枢纽，满足通航要求。

嫩江干流已建成了尼尔基水利枢纽，第二松花江已建成了白山、红石、丰满水电站，其余水电站（水利枢纽）还处于前期论证阶段。

牡丹江为松花江水能资源较丰富的支流，规划了上沟、镜泊湖、兰岗、莲花、二道沟、长江屯、晨光按 7 级开发，总装机容量 994.3MW，多年平均年发电量 18.82 亿 kW·h，其中莲花水电站装机容量 550MW，已于 1998 年发电；晨光水电站装机容量 12.5MW、镜泊湖水电站装机容量 96MW、上沟水电站装机容量 15.8MW 均已投产发电。

suxing lixue

塑性力学

塑性力学　(plastic mechanics)　研究物体的永久变形和作用力之间的关系以及物体内部应力和应变的分布规律，是固体力学的一个分支学科。塑性力学所考虑的永久变形只与应力和应变的历史有关，不随时间变化。在工程实践中，塑性力学理论用于研究如何发挥材料强度的潜力，如何利用材料的塑性性质，以便合理选材和制订加工成型工艺等。塑性力学理论还用于计算残余应力。

塑性变形的基本规律　人们对塑性变形基本规律的认识来自实验。从实验中找出应力超出弹性极限后材料的特性，将这些特性进行归纳并提出合理的假设和简化模型，确定应力超过弹性极限后材料的本构关系，从而建立塑性力学的基本方程。解出这些方程，便可得到不同塑性状态下物体内的应力和应变。描述塑性变形基本规律的要点主要包括屈服条件、流动法则和强化规律。

（1）屈服条件。材料处于弹性阶段还是塑性阶段的判据。屈服条件是屈服极限概念在复杂应力状态下的推广，其数学表达式为

$$f(\sigma_{ij},\varepsilon_{ij}^{p},k)=0 \tag{1}$$

式中 σ_{ij} 为应力张量；ε_{ij}^{p} 为塑性应变张量；k 为塑性内变量（如它可以是塑性功、塑性扩容、等效塑性应变等）。满足式（1）的状态为塑性状态，$f<0$ 的状态为弹性状态。

（2）流动法则。当材料进入塑性阶段后，其塑性应变增量的发展规律称为流动法则。通常，塑性变形增量可用塑性势的梯度表示，即

$$d\varepsilon_{ij}^{p}=d\lambda\frac{\partial g(\sigma_{ij})}{\partial\sigma_{ij}} \tag{2}$$

式中 $g(\sigma_{ij})$ 称为塑性势函数；$d\lambda$ 为一个非负的因子。取屈服函数为塑性势时，即 $f\equiv g$，这时称为关联的塑性流动，也称为正交的流动法则。当屈服函数与塑性势函数不同时，即 $f\neq g$，这时称为非关联的塑性流动。

（3）强化规律。强化规律是描述屈服面大小、性状和位置变化的规律。通常，塑性变形对应于微观上的位错运动。在塑性变形中不断产生新的位错，位错的相互作用提高了位错运动的阻力。这在宏观上表现为材料的强化，在塑性力学中则表现为屈服面的变化。对于理想塑性模型，假定发生塑性变形后，屈服条件不变。各种材料的强化规律应该通过材料试验获得。利用强化规律得到的加载面（即强化后的屈服面）可推导出材料的本构方程。

（4）塑性本构方程。根据式（2）和其他一些理论假设，可导出材料超过弹性极限后的本构方程为

$$d\varepsilon_{ij}^{p}=C_{ijkl}d\sigma_{kl}+h\frac{\partial g}{\partial\sigma_{ij}}\frac{\partial f}{\partial\sigma_{kl}}d\sigma_{kl} \tag{3}$$

式中 C_{ijkl} 为材料的弹性常数；h 为硬化函数，通过它可将流动法则中的 $d\lambda$ 和 ∂f 联系起来，即

$$d\lambda=h\partial f \tag{4}$$

反映塑性应力-应变关系的本构方程式（3）是以增量形式给出的，增量形式可以反映出塑性力学中变形的历程，反映塑性变形的本质。塑性力学中还有用全量应力和全量应变表达弹塑性材料本构关系的塑性全量理论，数学表达式比较简单，可用于解决简单加载或比例加载条件下的实际问题。

塑性力学问题求解　解题所使用的平衡方程、几何方程（即应变和位移的关系）以及力和位移的边界条件都和弹性力学中使用的相同，但在物理关系上则应以塑性本构方程代替弹性力学中的广义胡克定律（见弹性力学）。利用平衡方

程、几何方程、物理关系和所有边界条件可以求得超过屈服极限后的应力和应变分布以及内力和外载荷之间的关系。但是塑性力学的本构关系是非线性的，在具体计算时遇到一些数学上的困难，因此还要根据所研究问题的具体情况，进行简化，找出解决方法。用有限元方法可以成功地求解塑性力学问题。

塑性力学用于岩土类材料时，应考虑塑性体积应变以及材料的各向异性、非均匀性、弹塑性耦合、应变软化的非稳定材料和工程的非稳定性问题。

suiji shuilixue

随机水力学

（stochastic hydraulics） 应用概率论和数理统计方法研究水力过程的学科，是水力学的一个分支。许多水力过程包涵了各种非确定性因素，经典水力学惯用的确定性分析方法已不能完全适应。随机水力学的出现，提供了更多有关流动的信息，使人们的认识更加深入也更符合实际。另外，以概率论为基本风险分析（可靠性分析）方法在水力设计中的应用，也日益受到重视。

随机水力学常用的研究方法有随机流动和布朗（Brow）运动模型、马尔科夫（Марков）模型、误差理论与最小二乘法、统计矩阵和相关分析法、蒙特卡洛（Monte Carlo）随机模拟、卡尔曼（Karman）滤波等。

随机水力学的研究主要有紊流（湍流）力学中的统计理论、水流脉动压力的随机分析、两相流动的随机模拟、水力学的风险分析（可靠性分析）等方面。

紊流（湍流）力学中的统计理论　1921年G.I.泰勒（G.I.Taytor，1886—1975）最先应用统计方法分析紊流中的脉动现象，其后有A.H.柯尔莫哥洛夫（A.H.Колмогоров，1903—1987），T.V.卡门（T.V.Karman，1881—1963）及周培源等人对紊流统计理论的形成和发展都做出了重要贡献。紊流统计理论应用了相关分析和谱分析两种方法，以脉动量的各种统计矩构成表征紊动特性的相关函数、紊动比尺以及频谱函数、波谱函数等。

水流脉动压力的随机分析　按紊流统计理论，紊流场是不同尺度，不规则运动着的涡旋结构，其脉动压力反映了它的涡旋强度、尺度、周期及其组合的统计特性。脉动压力的幅值特征由其概率密度分布函数提供，频域特性由其谱密度函数和相干（凝聚）函数表征，时域特性可由其相关函数给出。

两相流动的随机模拟　有些两相（或多相）流动的主要形态是颗粒悬浮体的紊动扩散，如河流中的泥沙输移、污染物颗粒的扩散等。研究表明，用蒙特卡洛法或随机流动模型得到颗粒浓度分布及有关参数，等价于从质量守恒原理导出基本微分方程求解给出的结果。随机分析还被用来描述更为复杂的两相流动，如泥沙推移质不规则连续跃移运动的概率密度、凝聚颗粒（相干结构）随机碰撞的概率模型等。

水力学的风险分析（可靠性分析）　关于水力设计中的技术风险，早先采用安全系数法，进而发展了敏感性分析，20世纪60年代以来多采用风险分析方法。实用中，多是将水动力学数值模拟手段与风险分析方法相结合进行风险判断与评估。例如黄河三角洲水灾风险分析、施工导流方案的风险分析、设计流量的保证率分析等。

此外，随机分析方法在水力学领域其他方面的应用也日益广泛。例如：水力学实验的数据处理常用误差理论、最小二乘法、多元相关分析和逐步回归；水工建筑物水面线计算中，将糙率系数 n 视为非确定性变量，用推广的卡尔曼滤波方法求解；土基渗流场滤层设计的概率方法和渗流管涌的随机模型等。

参考书目

Pancher S. 随机函数和湍流．谈镐生，等译．北京：科学出版社，1976.

suiji shuiwen guocheng

随机水文过程

（stochastic hydrological process） 水文要素值有时序地随时间变化的一组随机变量。例如某一河流断面上的水位或流量循时序变化过程或某河段上的水位或流量沿程变化过程。常用的随机水文过程是在离散的时间点上取值的，又称水文时间系列，如年、月流量系列。在过去时间内观测到的水文系列，是该随机水文过程的一个样本。随机水文过程在未来可能出现的情况，只能在特定条件下，通过以往观测的样本对它的统计特性做出推断。

随机过程的统计特性可用某些特定的统计特征值来表示，如各时刻的随机变量的期望值与方差，不同时刻的随机变量之间的协方差等。随机过程的统计特性如不随时程而变，称为平稳随机过程，否则该随机过程是非平稳的。在不受人为因素影响的自然条件下，以年为时间单位的水文时间系列，如年径流量系列等，可视为平稳的；以较短时段为时间单位的水文时间系列，如月、日流量系列，则为非平稳的。

用概率和统计理论来分析水文时间系列的主要目的是建立能反映所论随机水文过程主要特征的数学模型。建立这类随机水文模型时，由于研讨对象不同，采用模型的结构有较大的差别。如果过程相邻值之间无相关联系，即过程是独立的，其数学模型可为

$$X_t=\mu+\sigma\varepsilon_t$$

式中 μ、σ 为 X_t 的均值和均方差；ε_t 为均值为零、方差为1的随机数。最简单的相依模型为

$$X_t=aX_{t-1}+b\varepsilon_t$$

式中 a、b 为待定参数；ε_t 的意义同上。

技术成熟、应用广泛的随机模型可归纳为回归类模型、解集类模型两大类。

（1）回归类模型。该类模型结构简单、概念清晰、参数不多、易于实现。其代表为单、多变量平稳和非平稳自回归滑动平均模型。

（2）解集类模型。该类模型的特点是能够同时保持总量和分量的统计特性和协方差结构，且分量之和等于总量。解集模型可分为单站典型解集模型、空间典型解集模型、单站相关解集模型和空间相关解集模型。

建立模型的主要步骤是选择模型类型、估计参数、检验拟合优度、分析不确定性等。建立的模型应能模拟历史系列的主要统计特征。

在制订流域系统的规划设计和运用方案时，多依据历

史水文系列，通过模拟分析途径来预估各方案实施后可能出现的状况。由于历史系列一般不长，反映的变动情况较少，丰枯组合不多，有些较复杂的问题用此种办法不易得出完满的结果。例如，多年调节水库的坝前水位及库区淹没水位的频率分析、水库群下游河道防洪风险分析、水库工程各种兴利指标的可靠度分析、多年调节综合利用水库的合理调度等，都是常规方法不易很好解决的问题。计算机技术的发展，为随机水文模型的应用创造了良好的条件。利用随机水文模型可生成必要数量的随机水文系列，以之作为流域系列的输入，通过随机模拟的途径，可对上述类型的问题求得解答。这方面的工作还开展得不太普遍，其原因是某些随机水文模型的性能还不太令人满意。另外，水文资料的不足，更是所有概率统计方法面临的共同问题。

suidong kaiwa

隧洞开挖 (tunnelling; tunnel excavation) 在地下或山体中，采用爆破或施工机具按设计要求破碎、清除岩土，以形成具有封闭断面通道的施工过程。隧洞开挖需根据不同围岩（即隧洞周围一定范围内对隧洞稳定有影响的岩体）条件选用不同的施工方法，主要施工方法有钻孔爆破法、新奥法、掘进机掘进法和顶管法等。

钻孔爆破法 隧洞开挖中最常用的开挖方法。根据围岩条件、隧洞形状、洞身断面大小、洞身长短和施工进度等要求，选用不同开挖方式，通过钻孔、爆破、支护、出渣等施工措施，逐段推进成洞的施工工艺。

开挖方式 隧洞钻孔爆破常用的开挖方式有全断面法、台阶法、导洞辐射法、支撑拱法、核心支撑法。

(1) 全断面法。适用于地质构造简单、围岩结构基本稳定，隧洞断面不太大的中厚层坚硬岩体的开挖。一般具有造价低、进度快，与隧洞衬砌施工的干扰较小的特点。中国鲁布革水电站的引水隧洞，圆形断面，面积 $61m^2$，采用全断面法开挖，单个工作面的月平均开挖进尺达 212m，月最高开挖进尺 373.5m。

(2) 台阶法。根据台阶形式可分为正台阶和反台阶两种，根据台阶长度可分为长台阶和短台阶两种。正台阶即先开挖隧洞上部，形成下部台阶；反之为反台阶。通常，大、中断面隧洞开挖多用正台阶和长台阶，机械化程度较低的隧洞开挖多用反台阶和短台阶，其优点是可以上、下台阶同时作业流水出渣（见图 1）。

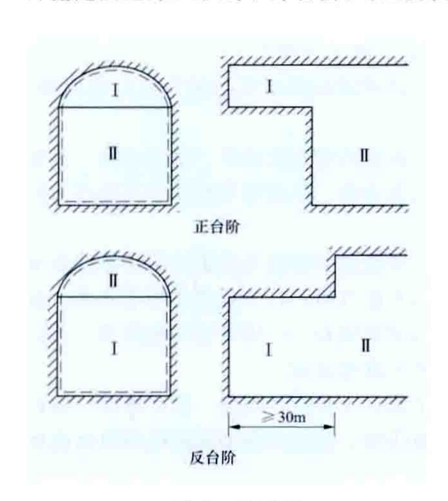


图 1 台阶法

(3) 导洞辐射法。根据导洞位于开挖面的位置可分为中心导洞辐射和下导洞辐射两种。导洞辐射法即先开挖导洞形成一定作业空间，然后在导洞内采用扇形辐射孔扩大开挖断面，适用于机械化程度较低时开挖大断面隧洞（见图 2）。

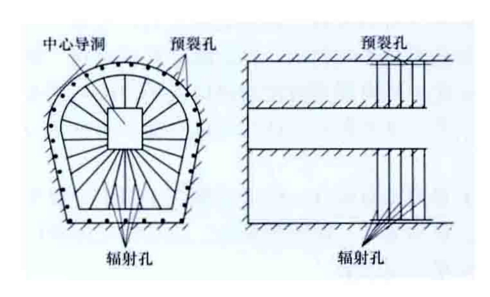


图 2 导洞辐射法

(4) 支撑拱法。适用于围岩稳定条件较差的地质结构中的大、中断面隧洞开挖，一般采用上导洞领先，然后开挖两侧顶拱，在局部顶拱衬砌后再开挖中间顶拱并封拱，根据围岩稳定情况扩挖其余部分成洞（见图 3）。

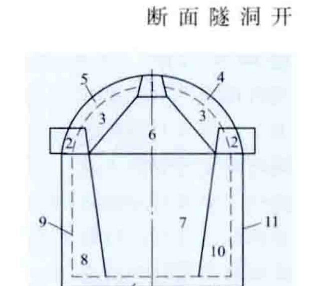


图 3 支撑拱法
1～12—施工顺序；
虚线—混凝土衬砌断面

(5) 核心支撑法。隧洞跨度大且围岩不稳定，或边墙稳定性差不能承受顶拱载荷的隧洞开挖中应用，先开挖两侧导洞，逐步扩大后衬砌边墙，顶留核心岩体作支柱，待顶拱开挖衬砌后再挖除岩体。这种方法开挖成本高、工期长，但在地质复杂的软弱岩层中使用比较安全（见图 4）。

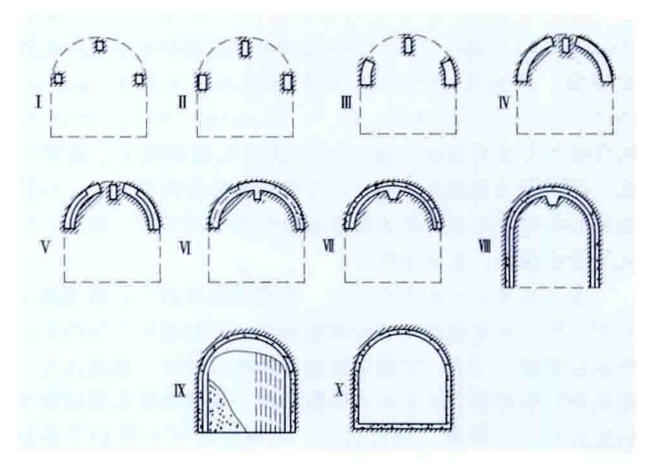


图 4 核心支撑法
Ⅰ～Ⅹ—施工顺序

钻孔 一般采用中心掏槽（即在开挖面中心部位布置的装药或不装药炮孔），周边用预裂爆破或光面爆破控制开挖轮廓，其余钻孔为使岩体破碎的崩落孔。常用的掏槽方式有平行直孔掏槽、扇形掏槽、楔形或锥形掏槽 4 种。崩落孔则为垂直于临空面的爆破直孔，在掏槽孔爆开一个孔洞后起到将岩体向孔洞继续崩落的作用。隧洞开挖按设计布置钻孔装药起爆，一般水工隧洞不允许欠挖，少量欠挖用机械铲除，并尽量减少超挖。

爆破 见钻孔爆破。

支护 隧洞开挖中遭遇不良地质地段、洞室交叉地段以及围岩容易失稳地段时，要根据地质条件、洞室结构、断面

尺寸、开挖方法和围岩暴露时间进行支护。（见地下工程施工支护）

出渣　隧洞出渣常用无轨运输或有轨运输：①无轨运输多用于断面较大的隧洞，用装载机或单斗挖掘机装渣，自卸汽车运输出渣。运距不大时，也可用装载机直接运输出渣。②有轨运输多用于中小断面隧洞，装岩机装渣，内燃机车或蓄电池机车牵引斗车或梭式矿车运输出渣。在短隧洞开挖量不大的小工程且无机车设备时，也还用人力推斗车运输出渣。

新奥法　新奥地利隧洞施工法的简称，利用围岩固有承载能力适时锚喷支护掘进的隧洞设计、施工方法。（见新奥地利隧洞施工法）

掘进机掘进法　用隧洞专用的掘进机进行隧洞开挖的方法。（见掘进机开挖）

顶管法　用钢管或预制的钢筋混凝土管形或箱形结构，前端设刃，后端用千斤顶将管身顶入土中就位，用人力或机械清除管内土方，是松软地层小型隧洞或涵管的特殊开挖方法，适用于修建穿越城市建筑物、江河河底及交通线下面的土基础或淤泥、流沙地层的隧洞。

sunshang lixue

损伤力学

（damage mechanics）　研究材料或结构在各种荷载或环境变化条件下，损伤随变形发展最终导致破坏的力学规律的学科，是固体力学的一个新兴分支。损伤是指细观结构缺陷（如微裂纹、微孔隙等）萌生、扩展等不可逆变化所引起的材料或结构宏观力学性能的劣化。

基于工程实践的需求，损伤力学得到了迅速发展，并在破坏分析、力学性能预计、断裂和疲劳、寿命估计及材料韧化等方面得到了广泛应用。损伤力学认为材料内部存在分布的微缺陷，如位错、微裂纹、微空洞等，这些不同尺度的微细结构是损伤的典型表现。损伤在热力学中，被视为不可逆的耗散过程。材料或构件中的损伤有多种，如脆性损伤、塑性损伤、蠕变损伤、疲劳损伤等。

损伤力学的研究方法总体上可分为微观方法、细观方法和宏观方法 3 种。

微观方法　在原子或分子的微观尺度上研究材料损伤的物理过程，并基于量子统计力学导出损伤的宏观响应。该方法着重于微观结构的物理机制，很少直接考虑损伤的宏观变形和应力分布，在建立微观结构变化与宏观力学响应之间的关系上尚存在较大难度。因此，微观方法很难直接用于工程结构的宏观力学行为分析。

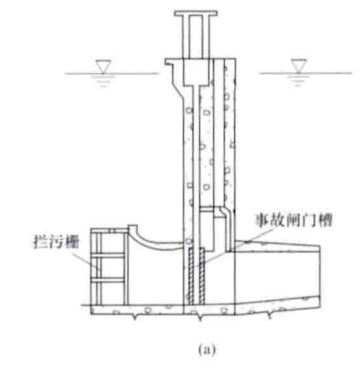
细观方法　从材料的细观结构出发，对不同的损伤机制加以区分，着眼于损伤过程的物理机制。该方法通过对细观结构变化的物理过程的研究，探索材料破坏的本质与规律，并采用某种力学平均化方法，将细观结构单元的研究结果反映到材料的宏观性质中。细观方法主要研究材料细观结构，如微裂纹、微孔洞、剪切带等的损伤演化过程，一方面它忽略了过于复杂的微观物理过程，避免了微观统计力学的繁琐计算，另一方面又包含了不同材料的细观几何构造，为损伤变量和损伤演化方程的建立提供了物理背景。

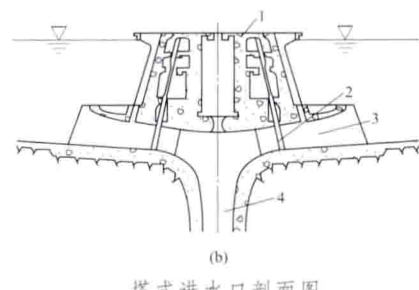
宏观方法　着眼于损伤对材料宏观力学性质的影响以及结构的损伤演化过程，而不追究损伤的物理背景和材料内部的细观结构变化。该方法是通过引进内部变量，将细观结构变化映射到宏观力学变化上加以分析，即在本构关系中引入损伤变量，采用带有损伤变量的本构关系真实地描述受损材料的宏观力学行为。由于宏观方法是从宏观现象出发，并且模拟宏观力学行为，因此方程及其参数的确定往往是半经验半理论的，且具有较为明确的物理意义，可直接反映结构的受力状态。所以，采用宏观方法建立的损伤本构方程便于应用到结构设计、寿命计算及安全分析中。但该方法不能从细、微观结构层次上弄清损伤的形态与变化。



tashi jinshuikou

塔式进水口 (tower intake) 独立布置于大坝或库岸以外，具有塔形结构的水电站进水口。这种进水口在平面上可以布置成单面单孔取水或周圈多层多孔径向取水，见图。径向取水是充分利用塔身周边作为取水前缘，可以取得较多的引用流量。基本做法是将环绕塔身下部的周边用支墩分开，布置成若干个取水孔口，在各孔口内设置拦污栅、事故闸门或检修闸门。水流经过各喇叭口沿径向流入竖井，经汇集之后，再转向进入水电站的压力管道。塔顶检修平台位于最高库水位以上，供安装启闭机、拦污栅及清污设备用，检修平台与库岸或坝顶之间设有交通桥，以便设备运输和运行人员的交通来往。





塔式进水口剖面图

(a) 单面取水；(b) 径向取水

1—闸门塔；2—闸门；3—径向进水口；4—竖井

当受库岸地形或坝体影响，不能环塔身全周边取水时，亦可采用沿单面或多面取水，可在塔身一侧或多侧布置取水口，水流沿闸孔流入，经汇集后进入水电站的压力管道。

塔式进水口可沿塔身在不同高程处设置多层取水口，这种分层取水的方式适用于在多泥沙、多污物或多冰凌且水位变幅大的水库中取水，以及适用于对控制下泄水温有要求的情况。在大型水库蓄水初期，要求在低水位情况下提前发电，可利用这种方式从底层取水，做到提前发电，早见效益。

Tai'an Choushui Xuneng Dianzhan

泰安抽水蓄能电站 (Tai'an Pumped Storage Power Station) 位于山东省泰安市内，距济南市70km。电站装机容量1000MW，以两回220kV出线接入山东省电网，担任调峰、填谷、调频、调相和事故备用等任务，见图1。

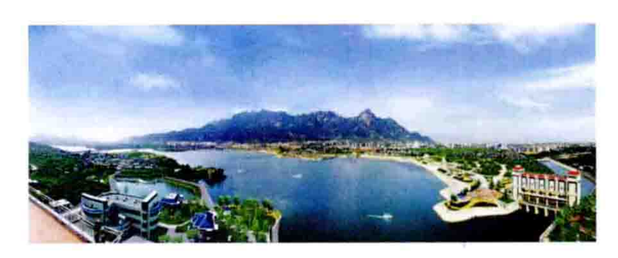


图1 泰安抽水蓄能电站

地形地质条件 工程区地震基本烈度为Ⅵ度，上水库和引水发电等主体建筑物按7度设计，下水库按6度设计。上水库位于三面临山的樱桃园沟上游，左岸山体雄厚、右岸横岭冲沟较发育。下水库地势较平坦。下水库为斜长片麻岩，上水库左岸局部有交互式花岗岩和斑纹状混合岩。上水库、输水和地下厂房系统建筑物地基和围岩均为混合花岗岩，岩体内穿插有闪长、辉绿和石英岩脉，且闪长岩脉有隔水作用。

枢纽布置 枢纽工程由上水库、下水库、水道系统、厂房等组成，见图2。

图2 泰安抽水蓄能电站枢纽布置图

上水库 坝址流域面积$1.43km^2$，多年平均径流量33.1万m^3，200年一遇设计洪峰流量$76m^3/s$，1000年一遇校核洪峰流量$97.3m^3/s$，正常蓄水位410.00m，死水位386.00m，总库容1047万m^3，调节库容890.0万m^3，具日调节性能。大坝为混凝土面板堆石坝，最大坝高99.8m，坝顶长540.46m。库盆采用复合式土工膜，垂直灌浆帷幕和混凝土面板综合防渗。

下水库 改建后的大河水库，以发电为主并兼顾防洪、灌溉和工业用水。坝址以上流域面积$84.5km^2$，多年平均径流量1913万m^3，100年一遇设计洪峰流量$1490m^3/s$，1000年一遇校核洪峰流量$2200m^3/s$，正常蓄水位165.00m，死水位154.00m，总库容2997.1万m^3，发电库容890万m^3，具有不完全多年调节性能。大坝为位于软基上的均质土坝，最大坝高22m，坝顶长460m，坝基由灌浆帷幕防渗。位于右岸的正槽式溢洪道净宽50m，底流消能，7扇挡水闸门尺寸均为7.5m×9.3m。

水道系统 由上水库进/出水口、引水洞、压力管道、岔管、尾水洞、尾水调压井、下水库进/出水口、开关站组成。电站额定水头225m。上库进/出水口位于右岸，底板高程370.00m。引水隧洞采用两洞四机布置，总长572.6m，洞径为8.0m。尾水隧洞总长1493.0m，洞径为8.5～6.0m，尾水事故门尺寸为4.8m×5.2m。阻抗式调压井大井直径17m，最大高度62.3m。下水库进/出水口底板高程130.9m，检修门尺寸为7.0m×8.0m。

厂房　首部式地下厂房，尺寸为 180.00m×24.50m×52.275m（长×宽×高），厂房内安装有 4 台单机 250MW 的可逆式水泵水轮发电电动机组。机组额定转速 300r/min，吸出高度－53m。开关站为地面户内式 GIS 布置形式，地面开关站与 220kV 出线场布置在地下厂房洞室群的上方，地面高程为 346.00m，出线竖井连接地下厂房。

工程施工　上水库采用围堰一次断流，左岸导流洞导流；下水库施工时放水至死水位，利用非汛期完成溢洪道、放水洞改建和坝基加固工程。工程于 2001 年 7 月 1 日开工，2006 年 6 月 18 日第一台机组发电，2007 年 3 月 4 台机全部投产发电。

主要工程量：土石方明挖 710.15 万 m^3，洞挖 84.44 万 m^3，混凝土 38.12 万 m^3，土石方填筑 640.14 万 m^3，帷幕灌浆 5 万 m。固结灌浆 12.4 万 m，钢筋、钢材 2.12 万 t。

设计单位　中国水电顾问集团华东勘测设计研究院、中国水利水电建设工程咨询公司。

建设单位　国网新源控股有限公司山东泰安抽水蓄能电站有限责任公司。

tanxing lixue

弹性力学　（elastic mechanics）　研究弹性物体在外力和其他外界因素作用下产生变形和内力的学科，是力学的重要分支。弹性力学又称弹性理论，是材料力学、结构力学、塑性力学和某些交叉学科的基础，广泛应用于土木、机械、电力、化工和航天等工程领域。

基本规律　弹性力学所依据的基本规律有变形连续规律、应力-应变关系和运动（或平衡）规律。

（1）变形连续规律。弹性力学考虑物体的变形，但只限于考虑原来连续且变形后仍然连续的物体，物体在变形过程中不产生新的不连续面的情况。反映变形连续规律的数学方程有两类：几何方程和位移边界条件。几何方程反映应变和位移的联系，它的力学含义是应变完全由连续的位移所引起。在笛卡儿坐标系中，几何方程为

$$\varepsilon_{ij}=\frac{1}{2}\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j}+\frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)\quad(i,j=1,2,3)\tag{1}$$

式中 ε_{ij} 为应变分量；u_i、u_j 为与 x_i、x_j 相应的位移分量；x_i、x_j 为坐标系的坐标。若边界上的位移为已知量，则边界条件为

$$u_i=\overline{u}_i\quad(i=1,2,3)\tag{2}$$

式中 u_i 为物体的位移。

（2）应力-应变关系。弹性体中一点的应力状态和应变状态之间存在着一定的联系，这种联系与如何达到这种应力状态和应变状态的过程无关，即应力和应变之间存在一一对应关系。若应力和应变呈线性关系，这个关系便叫广义胡克定律。各向同性材料的广义胡克定律有两种常用的数学形式，即

$$\sigma_{ij}=\lambda\varepsilon_{kk}\delta_{ij}+2G\varepsilon_{ij}\tag{3}$$

和

$$\varepsilon_{ij}=\frac{1+\nu}{E}\sigma_{ij}-\frac{\nu}{E}\sigma_{kk}\delta_{ij}\tag{4}$$

式中 σ_{ij} 为应力分量；λ、G 为拉梅常数，G 又称剪切模量；ε_{kk} 为 3 个正应变之和，称为体积应变；σ_{kk} 为 3 个正应力之和，称为体积应力；δ_{ij} 为克朗内克（Kronecker）记号；重复出现下标表示对 1、2、3 求和；ν 为泊松比；E 为杨氏模量（或弹性模量）。λ、G、E 和 ν 这 4 个常数之间存在下列关系

$$\left.\begin{aligned}\lambda&=\frac{\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)}\\G&=\frac{E}{2(1+\nu)}\end{aligned}\right\}\tag{5}$$

式（3）适用于已知应变求应力的问题，式（4）适用于已知应力求应变的问题。此外，还有其他非线性的应力-应变关系。

（3）运动（或平衡）规律。处于运动（或平衡）状态的物体，其中任一部分都遵守力学中的运动（或平衡）规律。反映该规律的数学方程有运动（或平衡）微分方程和载荷边界条件两类。在笛卡儿坐标系中，运动（或平衡）微分方程为

$$\frac{\partial\sigma_{ij}}{\partial x_j}+f_i=\rho\frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2}\quad(i,j=1,2,3)\tag{6}$$

式中 f_i 为作用在物体上的体力（外载荷的体积密度）载荷分量；ρ 为材料密度；t 为时间。方程（6）实质上是从物体中隔离出来的一个微小平行六面体的运动方程。在平衡问题中，惯性力 $\rho\frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2}$ 很小，忽略这些惯性力，便得到弹性力学中的平衡微分方程。如果考虑物体一部分边界上有给定的外载荷，则根据作用力和反作用力大小相等方向相反的原理，其边界条件为

$$\sigma_{ij}\alpha_j=\overline{p}_i\quad(i,j=1,2,3)\tag{7}$$

式中 α_j 为边界外法线方向的方向余弦；$\overline{p}_i$ 为给定的边界载荷分量。

问题和求解　弹性力学平衡问题的解法由上述 3 个基本规律给出，而弹性力学的动力学问题，除此之外还需说明物体的初始状态，即

$$当\ t=t_0\ 时\quad u_i=u_{i0},\ \frac{\partial u_i}{\partial t}=v_{i0}\quad(i=1,2,3)\tag{8}$$

式中 t_0 为初始时间；u_{i0} 和 v_{i0} 分别为物体在初始时刻的位移和速度，它们都是给定的函数。求解一个弹性力学问题，就是设法确定弹性体中各点的位移、应变和应力等 15 个函数。即根据几何方程式（1），应力-应变关系式（3）或式（4），运动（或平衡）方程式（6），边界条件式（2）和式（7）以及动力学问题中的初始条件式（8），解出 u_i、ε_{ij} 和 σ_{ij} 等 15 个函数。常用的求解方法有解析法和数值法。解析法包括分离变量法和弹性力学的复变函数方法。数值法中使用最多的是能量法，它把弹性力学问题转化为数学中的变分问题（泛函的极值和驻值问题），然后用瑞利-里茨（Rayleigh-Ritz）法求解。广泛使用的有限元法本质上也属于能量法。其他的数值分析方法还包括差分法、边界元法和加权残数法等。

简史　英国人 R. 胡克（R. Hooke，1635—1703）于 1678 年和法国人 E. 马略特（E. Mariotte，1620—1684）于 1680 年分别独立地提出了弹性体变形与外力成正比的定律，后被称为胡克定律。胡克定律与牛顿力学三定律奠定了建立弹性力学数学理论的基础。19 世纪 20 年代法国人 A. L. 柯西（A. L. Cauchy，1789—1857）明确提出了应变、应变分量、应力和应力分量的概念，建立了弹性力学的几何方程、

运动（平衡）方程、各向同性及各向异性胡克定律，与法国人 C. L. M. H. 纳维（C. L. M. H. Navier，1785—1836）一起，基本上建立了弹性力学的数学理论。从 20 世纪 20 年代起弹性力学进入一个新的发展时期，在发展经典理论的同时，广泛地探讨了许多复杂的问题，出现了各向异性和非均匀体的理论、非线性弹性理论、热弹性理论、气动弹性力学和水弹性理论以及黏弹性理论等。

Teli Shuidianzhan

特里水电站（Tehri Hydropower Station） 位于印度北方邦特里区的巴吉拉蒂（Bhagirathi）河上。工程主要开发任务为发电、灌溉、防洪和供水。工程分两期建设，一期工程包括一座 260.5m 高的土石坝，装机容量为 1000MW 的常规水电站，二期工程将建设一座装机容量为 1000MW 的抽水蓄能电站。采用 750kV 输电线路将电力送往密拉特地区，见图 1。



图 1 特里水电站

水文和水库特性 坝址控制流域面积 7511km²，最大可能洪水流量 15540m³/s。水库正常蓄水位 830.00m，水库面积 42km²，设计洪水位 835.00m，库容 35.4 亿 m³；死水位 740.00m，相应库容 9.25 亿 m³。

工程地质条件 坝址处河谷狭窄，在河床高程处仅宽 30m，两岸库坡陡峻。河床覆盖层 10～15m，坝址岩层为裂隙发育的千枚岩。坝址区属强地震区，基本烈度为Ⅷ度。

枢纽布置 枢纽工程由大坝、泄水建筑物、引水发电系统及二期抽水蓄能电站等组成，见图 2。

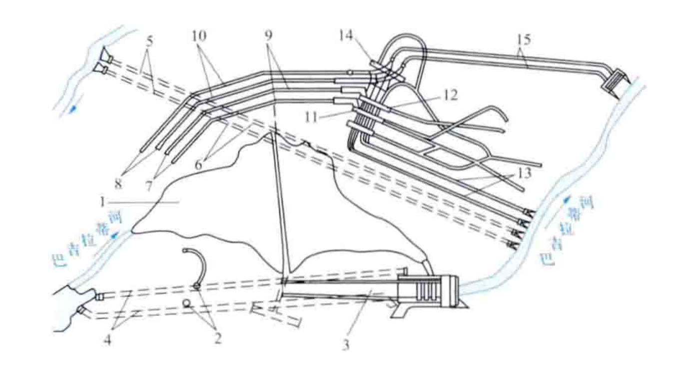


图 2 特里水电站枢纽平面布置图

1—大坝；2—右岸竖井泄洪洞；3—岸边溢洪道；4—右岸导流洞；5—左岸导流洞；6—左岸竖井泄洪洞；7—常规水电站进水口；8—抽水蓄能电站进水口；9—常规水电站引水管道；10—抽水蓄能电站引水管道；11—常规水电站主厂房；12—主变压器洞；13—常规水电站尾水洞；14—二期抽水蓄能电站厂房（待建）；15—二期抽水蓄能电站尾水洞（待建）

大坝 土质斜心墙堆石坝，最大坝高 260.5m，坝顶高程 839.50m，坝顶长 592m，坝顶宽 25.5m，底部河床中部处最宽达 1125m。上、下游坝坡坡度分别为 1∶2.5 和 1∶2.0。坝体包括不透水心墙，上、下游侧反滤层，透水坝壳区、抛石护坡。堆石最大粒径为 600mm。坝体总填筑量约 2798 万 m³，包括作为坝体一部分的围堰。

泄水建筑物 溢洪道位于右岸坝肩处，设计泄量 5500m³/s，设 3 孔，单孔宽 10.5m，堰顶高程 815.00m，用弧形闸门控制，下游采用消力池消能。左、右岸各有 2 条竖井水平旋流泄洪洞，均由导流洞改建而成，竖井直径均为 12.0m。右岸 2 条竖井水平旋流泄洪洞不设闸门控制，采用喇叭口式进水口，堰顶高程 830.20m，设计泄量 3700m³/s；左岸 2 条竖井泄洪洞进口采用弧形闸门控制，堰顶高程 815.00m，设计泄量 3800m³/s。设 1 个中孔，进口底坎高程 700.00m，直径 8.5m，在库水位 830.00m 时下泄流量为 800m³/s，主要用于机组不运行时向下游供水。

引水发电系统 引水系统位于左岸地下，电站进水口高程 720.00m，采用一管两机的引水方式，隧洞直径 8.5m，总长 1634m。在压力钢管处分岔，每条压力钢管直径 5.75m，总长 1040m。常规水电站地下式厂房，长 197m，宽 22m，高 47.2m。厂房内安装 4 台单机容量为 250MW 的混流式水轮发电机组。两台机组共用一条尾水隧洞，单洞直径 9.0m，长度分别为 862.5m 和 747.5m。水轮机最大水头 231.5m，最小水头 127.5m，设计水头 188.0m。发电机容量 306MV·A，电压 15.7/400kV。采用室内 SF_6 开关站。

二期抽水蓄能电站 二期工程将利用特里水库为上水库，在下游建设一座水库作为下水库，建设一座抽水蓄能电站用于系统调峰，下水库可装机 400MW。其引水系统和地下厂房均位于一期常规电站引水发电系统左侧。两条直径均为 8.5m 的引水隧洞分别接一座带有上室和下室的调压室，井高 150.3m。每座调压室后接 2 条压力钢管，单管直径 6.0m，采用钢衬。设 2 座尾水调压室，直径均为 18.44m，高 100.85m。2 条尾水隧洞直径均为 9.0m，长分别为 1081m 和 1176m。地下厂房长 201m，宽 25.4m，高 57.3m。计划安装 4 台可变速的混流可逆式机组，单机容量为 250MW，总装机容量为 1000MW。发电水头范围为 120.4～219.4m，水泵工况水头范围 130.5～229.5m，吸出高度 −38m，设计水头 188m。发电机容量 275MV·A。二期工程尚未开工。

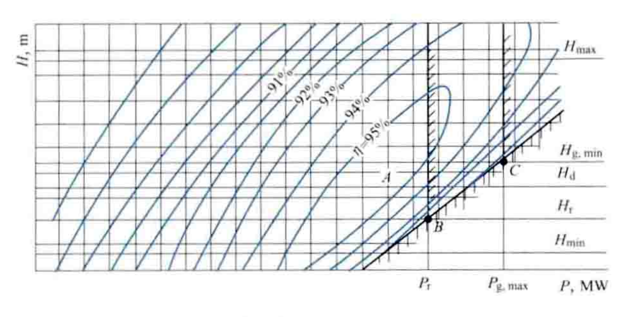
工程施工 一期工程采用导流洞导流，左岸 2 条导流洞，直径 11.0m，长分别为 1774m 和 1778m；右岸 2 条导流洞，直径 11.0m，长分别为 1298m 和 1429m，施工导流量为 8120m³/s。工程于 1994 年开工，2005 年 5 月完工，首台机组于 2006 年 7 月 30 日发电，2010 年 3 月 4 台机组全部投入发电运行。

tezheng shuitou he yangcheng

特征水头和扬程（characteristic head of water turbine and pump） 水电站设计和运行时用来表征水力机械各

种特性的水头和扬程。

特征水头　工程中常用的特征水头见图。



水轮机特征水头示意图

H_{max}、H_{min}—水轮机最大、最小水头；H_d—水轮机设计水头；H_r—水轮机额定水头；$H_{g,min}$—发电机发出最大功率的最小水头；P_r—发电机额定功率；$P_{g,max}$—发电机最大功率

(1) 水轮机（或水泵水轮机的水轮机工况，下同）最大水头 H_{max}。在运行范围内，水轮机水头的最大值。其值通常定为电站最大水头 $H_{z,max}$减去机组空载运行时输水系统水头损失后的工作水头。

(2) 水轮机最小水头 H_{min}。在运行范围内，水轮机水头的最小值。其值通常定为机组运行范围内电站最小水头减去机组满载运行时输水系统水头损失后的工作水头。

(3) 水轮机加权平均水头 H_w。在电站运行范围内，考虑负荷和工作历时的水轮机水头的加权平均值，该值通过水库运行计算确定。在此水头与水轮机最大水头之间所发电量同此水头与水轮机最小水头之间所发的电量相等。

(4) 水轮机设计水头 H_d。水轮机在最高效率点运行时的净水头。实践中，设计水头一般接近加权平均水头。

(5) 水轮机额定水头 H_r。水轮机在额定转速下，发电机能输出额定功率时的水轮机最小水头，其值通常作为水轮机的铭牌水头。

(6) 发电机发出最大功率的最小水头 $H_{g,min}$。其值为发电机发出设计规定的最大功率时，水轮机所需的最小水头。

特征扬程　工程中常用的特征扬程有：

(1) 蓄能泵（或水泵水轮机的泵工况，下同）零流量扬程 $H_{p,0}$。其值为蓄能泵在额定转速运行时流量为零的扬程。

(2) 蓄能泵最大扬程 $H_{p,max}$。其值为在规定运行条件下，允许蓄能泵达到的扬程最大值。

(3) 蓄能泵最小扬程 $H_{p,min}$。其值为在规定运行条件下，允许蓄能泵达到的扬程最小值。

tiduan baopo

梯段爆破　(bench blasting)　石方开挖中，使开挖面呈阶梯状并利用毫秒爆破技术逐段、逐排、逐阶进行爆破的爆破技术。广泛用于露天、地下洞室等各种岩石的开挖作业中。梯段爆破根据爆破岩体梯段高度分为深孔梯段爆破和浅孔梯段爆破。①深孔梯段爆破：一般孔深大于5m，孔径大于75mm。②浅孔梯段爆破：一般孔深小于5m，孔径小于70mm。

梯段爆破采用台阶分段起爆，一般单位耗药量较小，与洞室爆破比较，二次解炮工作量少，对保留岩体的影响小，爆破后壁面平整，对边坡稳定有利，易于采用综合机械化施工；适用于采石场，坝基、路基、溢洪道开挖，大直径地下洞室的台阶法掘进。

梯段爆破的要素与岩层性质、机械性能和炸药种类有关。①炮孔形式：有垂直孔和倾斜孔两种，一般倾斜孔优于垂直孔，但岩层破碎，容易堵孔卡钻时也常采用垂直孔。②布孔方式：有单排布孔和多排布孔两种，多排布孔又分为矩形和梅花形两种。③钻孔直径：与采用的梯段高度有关，对水电工程，深孔爆破钻孔孔径不宜大于150mm，紧邻设计建筑基面、设计边坡、建筑物或防护要求目标时不应采用大孔径爆破方法。④梯段高度 H：与钻孔及挖掘机械的工作性能、岩石的稳定性及允许的单响药量有关，一般为8～15m。⑤底盘抵抗线 W_d：与炸药种类、岩石性质、钻孔直径及台阶高度有关，一般可按 $W_d=(0.4\sim0.9)H$ 确定。⑥超钻深度 ΔH：为了克服台阶底盘岩石的夹制作用，使爆破后不残留根底，形成平整的底部平面，钻孔需有一定超深，通常钻孔超深值为 $(0.15\sim0.35)W_d$。⑦起爆方式：梯段爆破通常采用毫秒爆破（微差爆破），有排间顺序起爆、分区顺序起爆等方式。

tiji shuidianzhan

梯级水电站　(cascade hydropower stations)　分布在一条河流的上下游有水流联系的水电站群。梯级中的各级水电站可以是坝式水电站、引水式水电站或混合式水电站，它们在河流平面图和纵断面图上的位置见图1和图2。若单独开发，各类水电站有各自的优缺点，若梯级连续开发，组成梯级水电站后，则可取长补短，获得梯级效益，如提高资源的利用率、协调水资源综合利用之间的矛盾、缩短总体工期、减少总投资等。

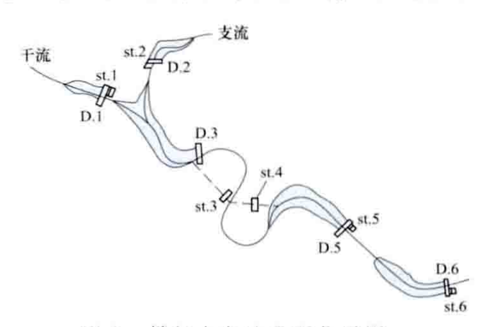


图1　梯级水电站平面位置图

D—坝址；st—厂址

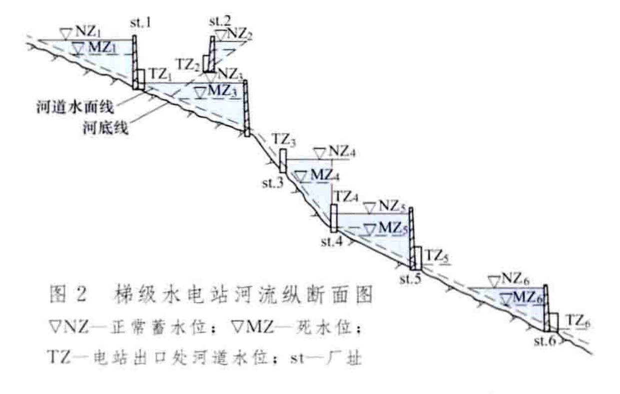


图2　梯级水电站河流纵断面图

▽NZ—正常蓄水位；▽MZ—死水位；TZ—电站出口处河道水位；st—厂址

梯级衔接　上级水电站的尾水位与下级水电站正常蓄水位之间的连接方式。梯级衔接是规划梯级布置中的一个重要问题，它关系到能否合理利用河流的水能资源，也关系到河流的通航能力和水生生物的生境。梯级衔接通常有基本衔接、重叠衔接和不衔接3种方式。

(1) 基本衔接。下级水电站正常蓄水位在上级水电站枯

水期平均流量和额定流量对应的尾水位之间。当下级水电站的库水位为上级水电站尾水位时，下级电站开发河段的水头得以较充分利用，也基本不减少上级电站的利用水头。但当下级水电站库水位低于上级水电站尾水位运行时，损失了一部分可利用的水头，两电站间有一段河道接近天然状态。实际上，多数情况下，当上级水电站发电运行，其发电尾水位将受下级水电站水库水位的顶托有不同程度的壅高，除非下级水电站库尾水流处于急流状态。

（2）重叠衔接。下级水电站正常蓄水位高于上级水电站发电额定流量对应尾水位。采用这种衔接方式，上级水电站减少的水头，全部增加到下级水电站，并不损失可利用的水头，考虑下级水电站水库回水的影响，往往可增加利用水头，尤其当上下两级电站间有支流汇入，且下级水电站的库水位经常低于正常蓄水位运行时，采用重叠衔接能更充分利用水能资源。中国南盘江天生桥一级水电站与其上游支流黄泥河的鲁布革水电站之间采用重叠衔接，主要为了天生桥一级水电站提高水头，使南盘江干流来水可以多发电。天生桥一级水电站和天生桥二级水电站间也采用重叠衔接，则主要是为了增大二级水电站的调节库容。

（3）不衔接。下级水电站正常蓄水位低于上级水电站枯水期平均流量对应的尾水位，有一部分水头未被利用，河流水能资源的利用率较低。在有些河段，为了减少水库淹没损失，或满足生态环境保护要求，往往采用这种方式。中国大渡河干流，为减少淹没损失和生态环境保护要求，在多处河段采用不衔接方式。

对于航运，采用基本衔接和重叠衔接运行方式可基本避免下级水电站库区河道出现部分处于天然状态的问题。

梯级效益　梯级水电站之间有密切的水流联系，其中某一级水电站水库的调节作用，可使其下游的所有梯级水电站受益；上下游水库联合调度，可协调解决发电和其他综合用水要求的矛盾等。

（1）上游水电站水库调节径流可增大下游所有梯级水电站的保证出力和年发电量。上游水电站水库在丰水期蓄水，所蓄水量转移到枯水期利用，下游各级水电站也相应减少丰水期来水量，增加枯水期来水量，减少丰水期弃水，增加枯水期发电量，同时下游的低水头水电站可以避免丰水期因水头降低而产生受阻出力或受阻容量（见水电站额定水头）。中国雅砻江上规划的两河口水电站，电站本身的保证出力只有1080MW，由于它的水库调节，可使下游10级水电站增加保证出力4447MW。

（2）对泥沙问题较严重的水库，为保持必要的调节库容或控制泥沙淤积高程而设置了排沙运行控制水位，由于上游水电站水库的拦沙作用，下游各级水电站可提高或取消排沙运行控制水位，从而增加发电量。

（3）上下游水库联合调度，可协调发电和其他用水要求的矛盾。如长江三峡水利枢纽承担电力系统调峰任务，因而出库流量每昼夜很不均匀。为满足航运要求，葛洲坝水利枢纽进行反调节，减小出库流量的变化幅度，使下游水位不陡涨陡落以保证航运。又如龙羊峡水电站水库与刘家峡水电站水库联合调度，灌溉期或黄河封河之初，刘家峡多放水，与其下游各级电站在日负荷的基荷区或腰荷区运行，多发电，以满足其下游灌溉用水和黄河冰盖高程要求；而龙羊峡水库少放水，与其下游刘家峡以上的梯级水电站一同少发电量，可在日负荷高峰区运行，把水蓄起来待枯水期利用。非灌溉期或黄河开河之前，龙羊峡多放水多发电，刘家峡少放水少发电，两组水电站群的工作位置相互交换。经过龙羊峡和刘家峡两座大水库联合调度，既充分满足刘家峡水电站下游河段灌溉用水和防凌的要求，又使黄河上游的梯级水电站整体按电力系统的要求运行。

（4）上游水电站水库削减洪峰、蓄存洪量，可提高下游各级水电站防洪标准，减小泄洪设施规模。由于龙羊峡水电站水库的调洪作用，使刘家峡、盐锅峡和八盘峡3座水电站的校核洪水标准分别由5000年一遇、1000年一遇和300年一遇，提高到可能最大洪水、2000年一遇和1000年一遇。

（5）上游电站水库有时可为下游电站缩短水库初期蓄水时间。当下游水电站需要初期蓄水时，可加大上游水库放水量，使下游水库尽快达到可发电的水位，提前投产运行。

tiji shuidianzhan jizhong jiankong

梯级水电站集中监控

（centralized supervisory control of cascade hydropower stations）　利用计算机、远动、通信技术，对梯级各被控水电站（包括梯级联合开关站、变电站）的运行实行不通过厂、站运行值班人员的直接集中监视、控制的技术和运行管理方式。梯级集控可以实现梯级水电站的水能经济调度、自动经济运行。实行集中监控的梯级水电站间，一般水流关系十分紧密，其出力、过流量及水头等运行参数相互间有许多相关约束因素，只有以整个梯级为对象，实现梯级的实时水能经济调度、自动经济运行，才能做到尽可能最大限度地充分利用水能，提高各水电站的运行水头，避免弃水，多发电量。集中监控可以大大提高整个梯级发电效率，提高发电量，带来明显的技术经济和社会效益。

实现梯调对各被控水电站的直接监视、控制后，各水电站进一步实现无人值班。

实行集中监控需满足的前提条件有：①梯级各水电站属于一个总厂统一管辖；②电网调度所同意对梯级各水电站实行通过梯级集控的间接调度；③梯级集控与梯级各被控水电站间应有良好的通信条件。

基本功能　梯级水电站集中监控的基本功能包括：

（1）实现对整个梯级各被控水电站的实时经济调度、自动经济运行。根据电网调度所下达的调度命令，包括电网自动发电控制、经济调度的实时调节信号和要求（即对整个梯级的总的发电有关要求），由梯级计算机集中监控系统根据梯级各水电站的具体情况和有关约束条件，以获得梯级的最大经济效益为目标。

（2）遥调和遥控。根据电网调度所下达的调度命令，自动或手动远程调节各被控水电站的频率和有功功率、电压和无功功率，远程进行机组各种运行工况的转换操作，以及各水电站和梯级联合开关站（变电站）电气接线的操作切换。

（3）遥测和遥信。实现对梯级各被控水电站、联合开关站（变电站）机电设备的安全监视，包括记录打印制表，事件自动顺序记录、事故追忆等。

（4）统计分析、运行管理和指导。

(5) 远程数据通信。

组成和总体系统结构　梯级水电站集中监控系统由梯级集控的计算机集中监控系统，各被控水电站、站的计算机监控系统、现地控制单元或远动终端以及连接这两部分的远动通道三大部分组成。其总体系统结构有：①梯级集控的计算机集中监控系统与各被控厂、站的计算机监控系统相连接，适用于被控水电站、站有一定规模，设置了计算机监控系统的情况；②梯级集控的计算机集中监控系统直接与各被控厂、站的各现地控制单元相连接，各被控厂、站不设独立的计算机监控系统，适用于通道条件允许或被控水电站机组台数很少、电气接线简单的情况；③梯级集控的计算机集中监控系统与各被控厂、站的微机远动终端连接。微机远动终端可具有现地监视功能，适用于被控水电站容量很小，全厂集中监控系统采取以常规监控设备为主方案的情况。根据梯级的不同情况，也可以采取混合方式。

信息交换要求　包括：①最低限度的要求以满足一般电网调度自动化系统的要求为度；②中等范围的要求基本上符合常规水电站中央控制室掌握的信息；③较高限度的要求包括厂、站计算机监控系统电厂控制级掌握的全部信息。

对于梯级集控来说，有条件也有必要适当扩大信息交换的范围。一般情况下，满足中等范围已大致可以，在设备及通道条件允许的情况下也可以进一步扩大，直至将厂、站计算机监控系统采集的信息全部上送。有的梯级也实现了厂、站现场工业电视实时动态图像的远程传送（遥视）。

Tianhuangping Choushui Xuneng Dianzhan

天荒坪抽水蓄能电站

(Tianhuangping Pumped Storage Power Station)　位于中国浙江省安吉县，距上海、南京和杭州分别为175、180km和57km，见图1。电站装机发电容量1800MW。以500kV输电线路2回接入华东电力系统，供调峰填谷、调频调相和事故备用之需。可以调节系统负荷中3720MW的峰谷差。可提供系统600MW旋转备用容量，并有调相功能。可使电力系统每年节煤13万～40万t。



图1　天荒坪抽水蓄能电站

枢纽布置　枢纽工程由上水库、下水库、水道系统、厂房等组成，见图2。

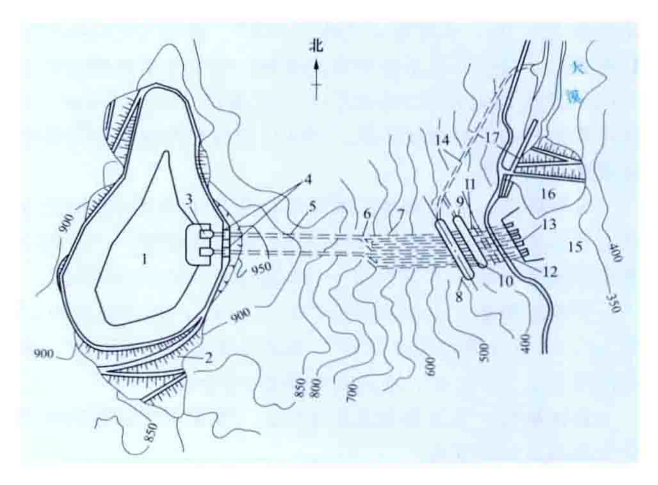


图2　天荒坪抽水蓄能电站枢纽平面布置图

1—上水库；2—上水库主坝；3—上水库进（出）水口；4—闸门井；5—高压引水隧洞；6—岔管；7—压力钢管；8—主厂房；9—母线廊道；10—主变压器洞；11—尾水闸门廊道；12—尾水隧洞；13—下水库进（出）水口；14—进厂交通洞；15—下水库；16—下水库坝；17—溢洪道

上水库和下水库　下水库建于太湖水系西苕溪的支流大溪上，上水库建于大溪的支沟沟源洼地上。上、下水库水平距离1km，两库底天然高差590m，输水道长度与平均发电水头之比约为2.5。

下水库坝址集水面积24.2km²，多年平均年径流量2450万m³，枯水年也能保证抽水蓄能电站用水。设计最高蓄水位344.50m，相应库容877万m³；最低蓄水位295.00m，死库容72万m³。按100年一遇洪水537m³/s设计，1000年一遇洪水860m³/s校核，并以可能最大洪水1280m³/s不漫坝作为特殊校核条件。大坝为混凝土面板堆石坝，最大坝高96m，坝顶长230m，坝顶高程351.20m。左岸设开敞式无闸门侧堰溢洪道，堰长60m，堰顶高程344.50m。左右岸设有由交通泄洪洞和施工导流隧洞改建的供水及放空水库的隧洞，洞径各为1m。下水库上游库尾设有拦沙坝，高21m，顶长57m，其河床段30m为溢流坝。

上水库集水面积很小，径流、洪水均可忽略。设计最高蓄水位905.20m，总库容885万m³；设计最低蓄水位863.00m，死库容50万m³。水库由主坝和4座副坝围筑而成。主、副坝均为沥青混凝土面板堆石坝。主坝最大坝高72m，坝顶长503m。副坝最大坝高为9.3～34m，4座副坝总长822.3m。水库库岸及库底均用沥青混凝土防渗。

水道系统　包括上、下水库的进/出水口，压力隧洞，岔洞和尾水洞。压力隧洞内径7m，共2条。自上水库的进/出水口起，分为上水平段、斜井段（倾角为60°）和下水平段三部分。下水平段后，每洞分为3条岔洞，内径3.2m，与机组相连。尾水洞直径4.4m，单机单洞，共6条。

厂房　地下式厂房。主要洞室有主副厂房洞、主变压器洞、母线洞、尾水闸门洞和交通洞等。主副厂房洞长198m，宽21m，高46.23m。主变压器洞长164.5m，宽17m，高约21m，与厂房洞平行，净距32m，与厂房洞有6条母线洞和1条主变压器运输洞相连。

主厂房内装有6台立轴单转轮单级混流可逆式水泵水轮机和配套的发电电动机组，转速500r/min。水轮机工况，最大水头607.5m，最小水头512m，额定水头526m，出力306MW，吸出高度−70m。水泵工况，最大扬程614m，最

小扬程 523.5m，水泵输入功率 313MW。起动方式以用变频装置为主，背靠背同步起动方式备用。发电电动机额定电压 18kV，发电额定容量 335MV·A，电动机容量 320MW。主变压器为三相双绕组变压器。500kV 高压配电装置为气体绝缘金属封闭电器。

工程施工 下水库施工采用右岸隧洞导流全年断流的导流方式。工程前期准备工作于 1992 年 6 月启动，1994 年 3 月正式动工，1998 年 8 月第一台机组投产，2000 年完建。

主要工程量：土石方明挖 584.1 万 m^3，石方洞挖 70.9 万 m^3，土石方填筑 569 万 m^3，混凝土浇筑 29.8 万 m^3，沥青混凝土 5.32 万 m^3，金属结构安装 6418t。

设计单位 华东勘测设计研究院（现中国水电顾问集团华东勘测设计研究院）。

建设单位 天荒坪抽水蓄能电站有限责任公司。

tianran guliao

天然骨料

（natural aggregate） 大自然产生的砂砾石经采集、筛洗分级后制成的混凝土骨料。天然细骨料主要是河砂、海砂和风化砂，天然粗骨料是河床和山沟里洪积的卵石和砾石。

水利水电工程有条件时首选天然骨料，可就地取材降低工程造价。天然骨料颗粒较圆、表面光滑、比表面积相对较小，拌制的混凝土和易性好，水泥用量和用水量较低。

天然骨料料源要经过调查、勘探、试验。在选择料场时，首先要确定料场中骨料的质量和储量能否满足工程要求，然后对各料场骨料的质量、开采条件、获得率、占地面积、交通运输条件及加工费用等进行技术经济综合比较后选定。有些料场由于天然级配与设计级配不匹配，为获得某级控制粒径的骨料，可采取两种办法：①增加开采量以得到所需控制粒径的骨料，但弃料量相应增加；②采用部分人工破碎的办法调节天然级配与设计级配的差额。具体措施应通过经济技术比较后确定。

tianran jianzhu cailiao kancha

天然建筑材料勘察

（natural construction materials investigation） 为查明各水工建筑物需要的天然建筑材料所进行的综合调查工作。常用的天然建筑材料有砂砾石料、土料、石料等。通过开展料场区地形测量、地质测绘、勘探、试验等勘察工作，查明各种天然建筑材料的分布、储量、质量和开采运输条件等，为工程设计提供依据。料场勘察随设计工作深度而加深，相应的勘察级别和勘探点密度、取样试验组数及储量计算精度要求是不同的。

勘察级别和要求 勘察级别分为普查、初查和详查，必要时可进行复查或补充详查工作。

（1）普查。在工程规划选点阶段对规划的河段或流域进行地质普查，辅以少量的物探及坑槽探，结合规划梯级布置选择料场和估算储量。

（2）初查。在预可行性研究阶段进行大、中比例尺地质测绘，了解料场地质及水文地质条件，布置勘探网点，查明料层分布及取样试验，初查储量要求不少于设计需要量的 2.5～3 倍，并进行料场比选。

（3）详查。在可行性研究阶段选定料场进行大比例尺地质测绘，加密原有勘探网点，进行勘探、取样及试验，要求详查储量不少于设计需要量的 1.5～2 倍。复核或补充详查多为核实已有资料的准确性或施工方案及料场的变更、设计和施工采用新的工艺等原因，需要另辟料源而进行的，其工作量视具体情况而定。不同天然建筑材料质量技术要求是不同的，应按用途遵循相关规程规定进行分析评价。

勘探和取样试验 天然建筑材料料场勘探点密度及取样数量，要根据勘察级别、地形及地质等因素确定的。布置原则是随勘察级别的提高，勘探网点逐渐加密。如砂砾石料勘探一般先用物探了解料场有用层的分布及地下水埋深，而后有针对性地用坑槽或钻孔控制。水上部分宜用坑槽，既便于观察料源层，又可满足取样的要求；水下部分多用较大口径的钻孔，孔深至最深开采层以下 1m 为宜。试验样品选取，既考虑层数，又须注意层厚，样品组数通常按产地的储量大小确定。样品的试验项目，以料源用途和规程具体规定进行选择。

储量计算 在料场平面图上根据圈定的料场范围，结合地形、料源层结构及勘探控制程度选择储量计算方法。常用的储量计算方法有平均厚度法、平行断面法及三角形法。计算时应扣除开采料源层上部及内部的无用层；计算深度至勘探实际控制的深度；分列水上、水下的储量。

勘察成果 勘察工作完成后，应及时编制天然建筑材料勘察报告并附必要的图件、附件。

Tianshengqiao Erji Shuidianzhan

天生桥二级水电站

（Tianshengqiao Ⅱ Hydropower Station） 位于中国红水河支流南盘江下游河段上，地跨贵州省安龙县和广西壮族自治区隆林县，距贵阳市 385km，有公路相通。初期装机容量 880MW，多年平均年发电量 49.2 亿 kW·h；最终装机容量 1320MW，多年平均年发电量 82 亿 kW·h。电站以 5 回（其中 1 回备用）500kV 输电线路向广东、广西和贵州送电，以 2 回 220kV 输电线路连天生桥一级水电站换流站的交流母线与天生桥一级联络，以 4 回 220kV 输电线路向广西、贵州送电，见图 1。



图 1 天生桥二级水电站

水文和水库特性 坝址以上流域面积 50 194km^2，占南盘江流域面积的 89.3%。多年平均流量 615m^3/s，多年平均年径流量 194 亿 m^3。100 年一遇设计洪水流量 13 500m^3/s，1000 年一遇校核洪水流量 19 400m^3/s。多年平均年输沙量 1490 万 t。总库容 0.88 亿 m^3，调节库容 0.184 亿 m^3，属日调节水库。

工程地质 坝址区地层为薄层灰岩夹页岩，引水隧洞洞

线通过的主要地层为灰岩和砂页岩，厂区主要地层为砂页岩。

枢纽布置　枢纽工程由大坝、泄水建筑物、引水发电系统等组成，见图2。

大坝　碾压混凝土重力坝，坝顶全长470.97m，最大坝高60.70m。

泄水建筑物　河床溢流坝段长138.1m，设有9个溢流表孔，孔口尺寸为12.0m×13.7m，由平板钢闸门控制，采用面流消能，护坦长30m。

图2　天生桥二级水电站枢纽平面布置图

引水发电系统　引水隧洞共3条，洞线近于平行，平均洞长9.77km。根据不同的开挖方法和衬护型式，隧洞各段内径不等，为8.7～9.8m。3座调压室均采用带上室的阻抗式，圆井内径21m，高88m。调压室后分为6条压力管道。压力管道内径5.7m。电站厂房为岸边式厂房，厂内安装6台混流式水轮发电机组，单机容量220MW。水轮机转轮直径4.50m，转速200r/min，吸出高度－5.50m。发电机为空冷半伞式，额定容量220MW，额定功率因数0.9，额定电压18kV。3台单台容量为500MV·A的500kV三相双绕组强油风冷组合式变压器及高压配电装置设在厂房后侧。500kV和220kV电压间设有750MV·A自耦联络变压器一组。

工程施工　采用明渠导流、过水土石围堰枯水期挡水施工方式。引水隧洞根据不同地层情况分别采用钻爆法和全断面掘进机（直径10.8m）开挖方式。

工程于1982年开始筹建，1986年11月截流，1992年12月第一台机组发电，1998年12月一期工程4台机组并网发电；2002年11月二期工程完成。

主要工程量：土石方明挖603万m^3，石方洞挖351万m^3，混凝土浇筑150万m^3，喷混凝土18.5万m^3，金属结构安装1.63万t。

设计单位　贵阳勘测设计研究院（现中国水电顾问集团贵阳勘测设计研究院）。

Tianshengqiao Yiji Shuidianzhan

天生桥一级水电站

（Tianshengqiao Ⅰ Hydropower Station）　位于中国红水河上游南盘江干流上，地跨贵州安龙县和广西隆林县，是红水河梯级水电站的最上一级。工程开发任务以发电为主，并可提高下游已建的天生桥二级、大化和岩滩3个水电站的保证出力和年发电量，同时对下游梯级水电站及河道防洪均有作用，见图1。电站装机容量1200MW，多年平均年发电量52.3亿kW·h。电站采用4回220kV出线引至马窝换流站，向广东送电采用直流±500kV电压。

水文和水库特性　坝址以上流域面积50 139km^2，占南盘江全流域的89.4%。多年平均流量612m^3/s，多年平均年径流量193亿m^3。多年平均输沙量1574万t，多年平均含沙量0.81kg/m^3。主体工程按1000年一遇洪水设计，洪峰流量20 900m^3/s，相应库水位782.87m，相应泄流量15 282m^3/s；按可能最大洪水校核，洪峰流量28 500m^3/s，相应库水位789.86m，相应下泄流量21 750m^3/s，总库容102.57亿m^3；正常蓄水位780.00m，相应库容83.95亿m^3；死水位731.00m，调节库容57.96亿m^3，具有多年调节性能。

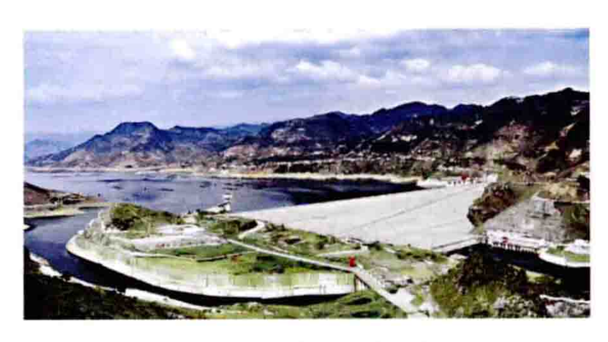


图1　天生桥一级水电站

枢纽布置　枢纽工程由大坝、泄水建筑物、引水发电系统等组成，见图2。

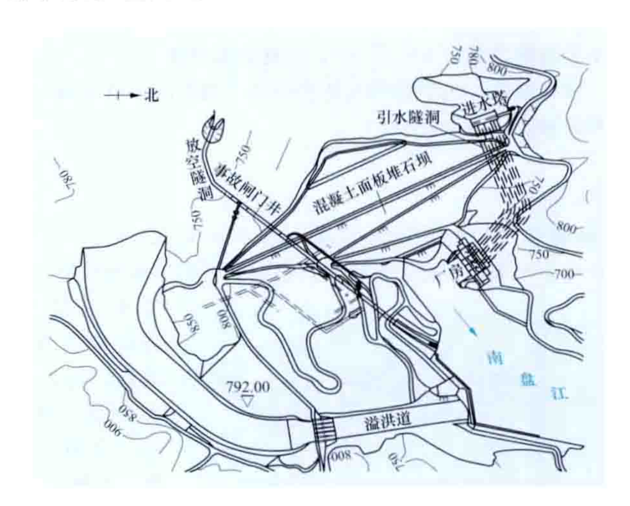


图2　天生桥一级水电站枢纽平面布置图

大坝　混凝土面板堆石坝，地震设防烈度为Ⅶ度。坝顶高程791.00m，最大坝高178m，坝顶长1104m，坝顶宽度12m，上游坝坡1∶1.4，下游综合坝坡1∶1.4，总填筑量约1800万m^3，面板面积17.4万m^2。混凝土面板厚度从坝顶部的0.3m渐变为坝底部的0.9m。充分利用溢洪道开挖料填筑大坝，未设专用料场。

泄水建筑物　溢洪道布置充分利用右岸“垭口”，引渠底宽120m，长1111m，溢流堰顶部高程760.00m，溢流前沿总宽81m，设5孔13m×20m的弧形工作闸门。设计泄量14 348m^3/s，校核泄量21 750m^3/s。泄槽长419.77m，在泄槽段共设五道坎槽式掺气槽。挑流鼻坎段采用两侧扩散的舌形鼻坎形式。

右岸放空隧洞全长1062m。进口底坎高程660.00m，压力洞段直径为9.6m，无压洞段断面为8m×12m。放空隧洞参与施工导流，在水库初期蓄水阶段为下游供水，运行期可作为旁通使用，必要时作为水库防控泄水通道。

引水发电系统　位于左岸，引水隧洞内径9.6m。高压

管道内径分别为 8.2、7.8、7.4、7.0m，采用 4 条单机单管引水道。两条导流隧洞长度分为 986m 和 1054m，断面尺寸为 13.5m×13.5m。

主厂房为岸边式地面厂房，包括安装场长 154m，宽 26m，高 67m，机组间距 24m。厂内装有 4 台水轮发电机组，单机容量 300MW，额定转速 136.4r/min，额定出力 310MW，额定流量 301.20m^3/s，最大水头、额定水头和最小水头分别为 143.0、111.0m 和 83.00m，效率 94.74%；发电机为立轴半伞式空冷三相同步发电机，额定容量 342.86MV·A，额定电压 18kV，额定电流 10 997A，额定频率 50Hz，额定转速 136.4r/min，功率因数 0.875（滞后）；主变压器为带无载调压开关的三相强迫油循环风冷式，额定容量 380MV·A，额定电压 242^{+1}_{-3}×25%/18kV，额定频率 50Hz；发电机-变压器采用单元接线。

工程施工 导截流建筑物由左岸 2 条导流隧洞和上下游过水土石围堰组成，初期坝面过水度汛，放空隧洞参加后期导流。工程于 1991 年筹建，1994 年 12 月截流，1998 年底第 1 台机组发电，2000 年底最后一台机组发电。

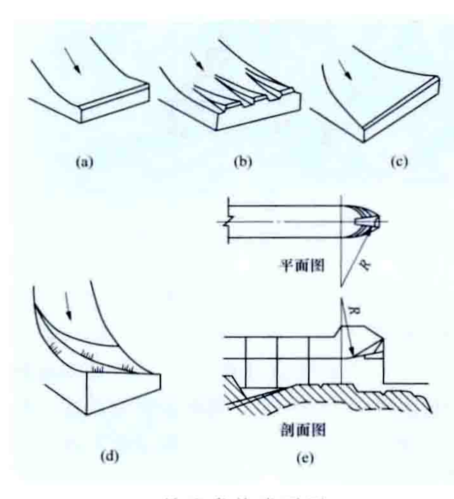
主要工程量：土石方明挖 2550 万 m^3，石方洞挖 103 万 m^3，土石方填筑 1900 万 m^3（其中坝体 1770.9 万 m^3），混凝土和钢筋混凝土 132 万 m^3，金属结构安装 18 300t。

设计单位 昆明勘测设计研究院（现中国水电顾问集团昆明勘测设计研究院）。

tiaoliu bikan

挑流鼻坎

（trajectory bucket；flip bucket） 设于泄水建筑物末端，导引高速水流挑射到下游河床水垫中消能的水工结构。挑流鼻坎有连续式、差动式、扩散式、扭曲式、窄缝式 5 种，见图。



挑流鼻坎类型图

(a) 连续式；(b) 差动式；(c) 扩散式；(d) 扭曲式；(e) 窄缝式

连续式挑流鼻坎体型尺寸简单，在工程中采用较多。差动式挑流鼻坎可使挑流水舌分散并在空中碰撞和掺气，消能效果较好，但需注意防止鼻坎空蚀。扩散式挑流鼻坎能使水舌在平面上充分扩散。窄缝式或扭曲式挑流鼻坎能适应窄峡谷地形，防止水舌冲刷岸坡，使挑流水舌顺河纵向扩散消能。

挑流鼻坎多用于高水头泄水建筑物，为了避免复杂的流态引起空蚀破坏和使射流的入水点远离鼻坎末端，一般鼻坎布置在下游最高水位以上，以便水舌下面能补气，形成挑流水舌，同时也使鼻坎具有检查维修的条件。为了加强碰撞消能的效果，可利用不同高程或不同平面位置的水舌相互对冲。

挑流鼻坎承受较大的动水压力，其基础应置于良好岩基上，并有一定埋深，以防回流冲刷。当河床岩石比较完整、坚硬时，采用挑流鼻坎消能是比较经济和可靠的。当地质条件较差时，形成的冲坑应不影响主体建筑物的安全和下游岸坡稳定。当下游河道水深较浅时，可考虑设置二道坝，以增加水垫厚度，此外也可预挖冲坑（水垫塘），以控制冲坑发展。

tiaohong kurong

调洪库容

（flood regulation storage capacity） 见校核洪水位。

tiaojie baozheng sheji

调节保证设计

（design of regulation guarantee）

在保证工程安全的前提下，以工程技术经济、合理为目标，并结合工程实际特点，通过水力过渡过程模拟研究，确定输水发电系统大波动控制性参数（调节保证设计值），评价小波动稳定性，必要时提出合理的运行限制措施。调节保证设计的核心内容是结合机组特性合理选择输水系统型式和特性，进行输水系统水力过渡过程计算（或称调节保证计算），通过计算预测不同甩负荷工况（即甩负荷前的机组初始工况）下的调节保证参数，并根据计算成果，结合工程经验，在留有适当裕度的基础上提出电站的调节保证设计值，以指导后续的机组招标、输水系统结构设计以及电站安全运行等。大中型水电站的水力过渡过程均采用计算机仿真程序进行计算。

正常发电运行时，水轮发电机组以匀转速运行，作用在水轮机转轮上的水力矩与阻力矩是平衡的。机组甩负荷瞬间，作用在水轮机转轮上的阻力矩骤减，水力矩克服机组转动部分的惯性使得机组转速迅速上升，出现最大转速；机组甩负荷瞬间，水轮机导叶开始紧急关闭截断水流，引水系统中流动着的水体由于受到阻挡而在惯性作用下造成流道水压升高，出现最大压力，尾水系统流动水体由于受到拖拽而在惯性作用下造成流道水压下降压，出现最小压力。由于水流速度瞬间改变，水电站输水系统中水体在惯性作用下产生的水压力骤升、骤降的交替变化现象称为水锤，也称水击。机组甩负荷过程中的转速上升幅度随导叶关闭时间 t_s 的延长而增大，而输水系统水压力的骤升、骤降幅度随导叶关闭时间 t_s 的缩短而增大。水压力骤升、骤降的幅度与机组的转速上升幅度是一对相互关联的物理现象，符合自然界能量守恒基本规律。对于确定的水电站输水系统和机组特性，不可能既减小水压力骤升骤降幅度，又同时降低转速上升幅度。机组甩负荷过程中，输水系统最大和最小压力、机组最大转速关系到电站输水系统和机组的建造成本以及电站运行安全，设计时必须预测其数值并确定相应的设计标准。

实践中，机组最大转速也可采用转速上升率（相对于机组额定转速）表征；输水系统最大和最小压力一般包括水轮机蜗壳末端或进口的最大压力或最大压力上升率（相对于初始压力）、引水系统最小压力（转轮高压侧）、尾水系统最大压力（转轮低压侧）、水轮机尾水管进口真空值、调压室底板最大压力、调压室最高最低涌浪等参数。通常将上述参数统称为调节保证参数，通过分析提出的调节保证参数的允许值（设计值）则统称为调节保证设计值。调节保证参数与输水

管道特性系数、机组飞轮力矩等参数密切相关。

输水管道特性系数 σ　反映机组甩负荷时导叶关闭过程中输水系统水体具有的动量的参数。该参数是决定机组甩负荷中输水系统压力骤升、骤降幅度的重要因素，σ 增大，压力骤升、骤降的幅度也增大。σ 的表达式为

$$\sigma = \frac{\Sigma Lv}{gHt_s}$$

式中 ΣLv 为引水管、蜗壳和尾水管长度和流速乘积的总和，m^2/s；g 为重力加速度，m/s^2；H 为最大静水头，m；t_s 为导叶关闭时间，s。

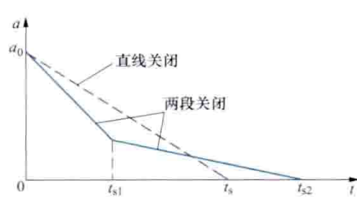
机组飞轮力矩 GD^2　反映机组转动部分所具有的惯性的参数。该参数是决定机组甩负荷过程中转速上升幅度的重要因素，飞轮力矩增大，转速上升幅度减小。

优化调节保证参数的措施　包括增加输水系统管径、设置调压室、导叶分段关闭、装设调压阀、加大机组的飞轮力矩等。

（1）增加输水系统管径。当引水管 ΣLv 值较大，适当加大输水系统管径，从而减小水流流速。

（2）设置调压室。当引水管 ΣLv 值过大，一般是 $\frac{\Sigma Lv}{gH}>3$ 时，在输水系统适当位置设调压室，从而减小输水系统长度。

（3）导叶分段关闭。当导叶按直线关闭规律不能满足调节保证要求时，可以采用分段关闭规律截断过机水流。两段关闭规律如图所示，前半段导叶快关，以限制机组的转速上升幅度；后半段导叶慢关，以限制输水系统压力骤升、骤降幅度。采用微机调速器后，可以用计算机软件来实现导叶的两段甚至多段关闭。



导叶分两段关闭示意图

a_0—导叶开度；t_s—直线关闭总时间；t_{s1}—第一段关闭时间；t_{s2}—两段关闭总时间

（4）装设调压阀。在机组甩负荷关闭导叶的同时迅速开启装设在反击式水轮机蜗壳上的调压阀泄流，然后调压阀再缓慢关闭，使导叶能够快速关闭，以限制机组转速上升幅度，同时延长水流截断时间，限制输水系统压力骤升骤降幅度。该方式仅适用于过机流量小的小型反击式水轮机。

（5）加大机组的飞轮力矩。适当增大发电机转子直径及质量，小型机组可以增装飞轮，以降低甩负荷过程中的机组转速上升幅度。

调节保证　机组供货厂家对机组转速上升率、蜗壳进口最大压力、尾水管进口真空值等调节保证值予以承诺和保证。

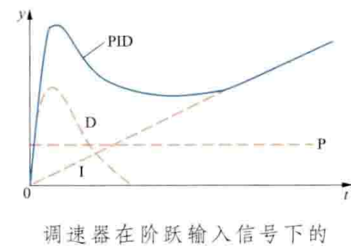
tiaosuqi tiaojie guilü

调速器调节规律　(regulation law of governor)

水轮机调速器输出信号与输入信号之间的函数关系。水轮机调速器的调节规律反映调速器的静、动态特性，常用的研究方法是经典控制理论。调速器实际使用的调节规律大多为比例-积分（PI）调节规律和比例-积分-微分（proportion-integral-differential，PID）调节。微机调速器的出现，使得一些较复杂和高级的调节控制规律和现代控制理论，如自适应 PID 调节、变结构变参数调节等有可能在水轮机调节中得到应用。

PI 调节　调速器的输出信号与输入信号及其积分成正比。比例（P）调节主要影响系统的响应速度，比例调节作用越强，响应越快；但比例调节作用太强，会引起较大的超调、振荡，甚至发散。积分（I）调节主要影响控制的静态精度，有利于消除静态偏差。系统稳态运行时，积分作用越强，静态精度越高，消除静差也越快；但积分调节作用太强，则会恶化动态品质。PI 调节同时具有比例和积分调节作用，可达到既减小系统静态偏差，又能保证系统的响应速度、不降低动态稳定性的效果。具有 PI 调节的调速器在合理整定其调节参数的情况下，可以满足引水管道水流惯性时间常数不是很大（一般情况下引水管道水流惯性时间常数 $T_w \leqslant 2.5s$）的电站水轮发电机组的调节要求。

PID 调节　调速器的输出信号与输入信号及其积分和微分成正比。常用比例（P）、积分（I）和微分（D）3 个环节的并联来实现 PID 调节（亦称并联 PID 调节）。比例环节的输出量每一瞬间都与输入量成正比，积分环节的输出量与输入量的积分成正比，微分环节的输出量与输入量的变化率成正比。调速器在阶跃输入信号下的 PID 动态响应曲线见图。



调速器在阶跃输入信号下的 PID 动态响应曲线

图中的 3 条虚线表示独立的比例（P）、积分（I）和微分（D）调节作用，实线表示 P、I、D 3 种调节作用叠加后形成的 PID 动态响应曲线。

相对于 PI 调节来说而言，PID 调节的关键是增加了微分调节作用。微分调节是按被调量偏差的变化速度进行的，能在偏差过大出现之前进行有效的校正，故能够减小系统的最大偏差（降低超调），增加系统的稳定性和减少调节时间，从而改善动态特性，但微分作用过强会使系统的抗干扰能力下降。具有 PID 调节的调速器综合了比例、积分和微分 3 种调节作用。适当设定、调整各环节的参数，就有可能使控制系统同时得到比较完善的动态和静态性能。大中型机组均采用具有 PID 调节的调速器。具有 PID 调节的调速器在合理整定其调节参数的情况下，可以满足 $T_w \leqslant 4s$ 的电站水轮发电机组的调节要求。

其他调节规律　主要有：①自适应 PID 调节。它利用现代控制理论，通过模型仿真，求出调速器在不同工况点的最优参数。实际运行时，计算机通过有效的计算处理方法，使得微机调速器始终以最优的调节控制参数运行在不同的工况点上，从而获得最优的静、动态特性。这种调节规律在实际的调速器产品中用得不多。②变结构变参数调节。它是介于自适应 PID 调节和 PID 调节之间的一种调节控制规律。从本质上讲，仍然是 PID 调节，但为了优化调节控制性能，采用了变结构和变参数的控制模式。所谓变结构，是指针对不同的调节参量，采用不同的控制结构模式，如转速调节、功率调节、水头调节及流量调节等，而且各种调节控制模式之间可以自动地平滑切换。所谓变参数，是指为了使调速器适应不同的调节方式，如空载调节、大电网调节、小电网调

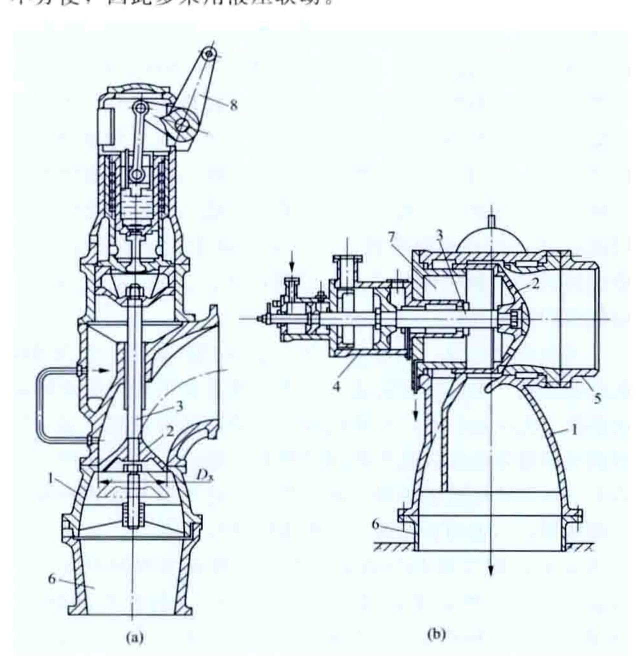
节及孤立电网调节等，选择几套不同的优化调节控制参数，以达到优化系统性能的目的。大多数微机调速器都不同程度地采用了变结构变参数调节规律。其他的调节控制规律还有非线性控制、状态反馈控制、水力振荡抑制控制、非最小相位补偿控制、鲁棒自适应控制等。

中国的水轮机调速器中，机械液压调速器主要采用 PI 调节，电气液压调速器主要采用 PID 调节，微机调速器主要采用改进型的 PID 调节（如变结构变参数调节等）。其发展趋势是几种调节规律的综合和优化利用，以适应不同的调节对象（如转速、功率、水压、流量等）和运行方式（如大电网、区域电网、孤立电网等）。

tiaoyafa

调压阀 (relief valve)　限制水电站引水系统水击压力升高值的阀门。调压阀一般由阀体、阀盘、阀杆、接力器、进口接管、排水管、平衡腔等组成，一般用于具有长引水系统无调压井的中小型水电站。在机组甩负荷导叶快速关闭的同时，调压阀开启，使来自上游压力管道的流量有相当一部分通过调压阀泄掉，限制水击压力不超过允许值。调压阀开启时流量增加的规律应和导叶关闭过程流量减少的规律相匹配，待导叶全关后，再缓慢关闭调压阀。由于导叶是快速关闭，机组转速上升值可限制在保证值范围内。调压阀是长引水系统水电站的重要安全设备，若调压阀拒动，需延长导叶关闭时间，以保证水压不超过允许值。

分类　按布置情况，调压阀分立式和卧式两种，见图。按调压阀和导叶间的联动方式，分为机械联动和液压联动两种。机械联动的横杆多，关节多，惯性大，累计的间隙和变形也大，使调压阀开启滞后于导叶开始关闭的时间长，布置不方便，因此多采用液压联动。



调压阀结构示意图

(a) 立式调压阀；(b) 卧式调压阀

1—阀壳；2—阀盘；3—阀杆；4—接力器；5—进口接管；6—排水管；7—平衡腔；8—联动横杆

运行方式　调压阀有节水和耗水两种运行方式，前者在正常运行时调压阀是关闭的，只在甩负荷或紧急停机时动作；后者在正常运行时调压阀开启泄水并与导叶协联动作，不仅能在甩负荷和紧急停机时动作限制水击压力，而且能在正常运行时加快增减负荷的速率，提高调节系统的稳定性，但耗水量大，仅适用于下游经常需要放水的情况。

tiaoyashi

调压室 (surge chamber)　减少压力管道正水击和有压尾水隧洞负水击作用的建筑物。常规调压室利用水体调压。气垫式调压室在封闭的洞室中储存压缩空气，利用水、气体调压。位于地面以上的调压室称调压塔，位于地面以下的调压室称调压井。位于机组上游侧的调压室称上游调压室，位于机组下游侧者称下游调压室，见图 1。当水电站的负荷变化，导叶开度改变产生水击时，调压室既可防止水击压力传播到压力管道或尾水隧洞中，又可减小高压管道、蜗壳及尾水管中的水击压力，同时可减小机组转速变化率，改善运行条件。是否设置调压室，应由调节保证计算和技术经济比较来决定。

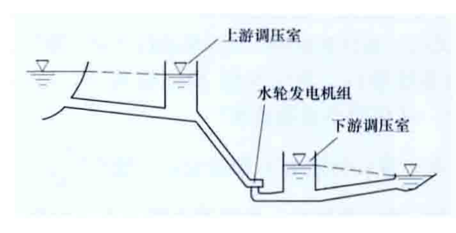


图 1　调压室位置示意图

工作原理　利用调压室容积容纳或补充由于负荷变化所减少或增加的进入水轮机的水体，从而减小水击作用，并截断或减小水击波继续向前传播。这时调压室内的水面产生波动。为了保证调压室水面波动逐渐衰减，调压室断面应大于托马临界稳定断面。托马临界稳定断面面积（F_{th}）的计算公式如下

$$F_{th}=\frac{Lf}{2g\left(\alpha+\frac{1}{2g}\right)H_1}$$

$$H_1=H_0-h_{w0}-3h_{wt0}$$

式中 L 为引水道长度，m；f 为引水道断面面积，m^2；g 为重力加速度，m/s^2；α 为引水道的水头损失系数；H_0 为静水头，m；h_{w0} 为引水道的水头损失，m；h_{wt0} 为压力管道和尾水出口到下游调压室间的水头损失，m。

基本类型　调压室有简单式、阻抗式、双室式、溢流式、差动式、气垫式 6 种，见图 2，其中阻抗式和差动式最为常用。

简单式调压室　如图 2（a）所示，特点是结构简单、水击反射条件好，但调压室中水位波动振幅大，衰减速度慢，对水轮机工作影响的时间长。正常运行时，引水系统与调压室连接处流速水头损失大，为避免此缺点，将引水道与调压室分开，用连接管连接，如图 2（b）所示。为了避免水击波进入引水道过大，连接管的直径不宜小于调压室处压力水道直径。简单式调压室已较少采用。

阻抗式调压室　如图 2（c）、图 2（d）所示，适用范围较广。这种调压室通过较小断面的孔口或连接管将室身与引水道连接起来。当丢弃负荷时，水由引水道经阻抗孔进入上

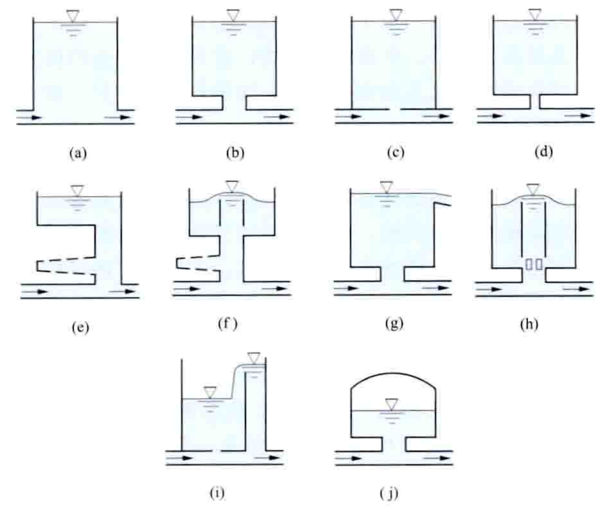


图 2 调压室基本类型示意图

(a)、(b) 简单式；(c)、(d) 阻抗式；(e)、(f) 双室式；(g) 溢流式；(h)、(i) 差动式；(j) 气垫式

游调压室，阻抗使水头损失增加，因而减小了调压室中水位波动的振幅。当增加负荷时，水由上游调压室经过阻抗孔进入压力管道，为了克服这种阻力，调压室中水位降低值也要小一些。

双室式调压室　如图 2（e）、图 2（f）所示，适用于电站水头较大，要求的稳定断面较小，而水库水位变化较大的水电站。这种调压室由断面较小的竖井和断面较大的上室、下室共同或分别组成。上室供丢弃负荷时储水用，一般应在最高静水位之上。下室在恒定流时充满水，供增加负荷时补给水量用，因而下室的顶板应在最低运行水位之下。在恒定流时，调压室中的自由水面位于竖井中，当丢弃负荷时，由于竖井的断面较小，井中水位上升很快，但进入上室后立刻缓慢下来，从而减小了水位波动振幅；增加负荷时，水位下降到下室中，在引水道开始供给水轮机所需流量之前，下室应有足够的水量。这种调压室上室的容积较小，因为当丢弃负荷时，引水道中水流的动能转化成上室中水的势能，因其重心比简单式调压室高，故同样的能量上室容积就较小。

溢流式调压室　如图 2（g）所示，溢流式调压室顶部设有溢流堰泄水。当丢弃负荷时，调压室的水位迅速上升，到达溢流堰顶后开始溢流，具有水位波幅小及衰减快的优点，但须设置泄水道以溢弃水量。适用于在调压室附近可经济、安全地布置泄水道的电站。

差动式调压室　如图 2（h）所示，适用于水位波动周期较长，而电站运行又要求加快衰减速度的水电站，具有溢流式和阻抗式调压室的优点。这种调压室由升管和大室两部分组成。升管设于调压室中，面积不小于引水道面积，上端为开口，下部沿升管圆周设有阻力孔口，调压室大室的水经阻力孔口与升管相通，升管底部以连接管与引水管道相衔接。大室直径较大，起盛水及保证水位波动稳定的作用。在水位波动过程中，大室与升管中的水位变化不同步，经常处于差动之中。当丢弃负荷时，因升管的直径较小、水头损失小，升管水位很快就升至顶部并开始溢流到大室。在水位升高的过程中，引水道首尾两端水位差减小得很快，升管溢流后，引水道尾端水位高于库水位，得以较快地减少引水道流来的水量；同时升管中的水位高于大室水位，大部分水量从升管顶部溢到大室，少部分水量通过阻力孔口流入大室，这个过程中能量损耗较大，因而调压室内水位波动衰减得较快；当增加负荷时，升管中的水位很快地降低，引水道首尾两端水位差增加得较快，引水道中流来的水量增加得也较快，同时水流由大室通过阻力孔口流入高压管道，以供给水轮机所需要的流量。差动式调压室也有把阻力孔口设在底板上，而把阻力孔口与升管分开的结构，如图 2（i）所示，这种结构施工较方便，水击反射条件较好。差动式调压室水位波动衰减较快，但是由于多了一个升管，使调压室的结构变得较为复杂。

气垫式调压室　如图 2（j）所示，调压室顶部完全封闭，内部充以压缩空气，适用于高水头且地质条件良好的地下水电站。这种调压室不受地形条件限制，可以尽量靠近厂房，以减小水击压力。由于所充的是压缩空气，因此减小了调压室内水位波动振幅。与常规调压室比较，可显著减小调压室高度，在地下电站中还可省去较长的通气洞。但调压室需配置压缩空气机定期向空气室补气，增加了运行费用。这种新型调压室首创于挪威，中国已经运行的气垫式调压室有自一里、小天都、金康、木座和阴坪等水电站。

tiaozheng gaisuan

调整概算　(adjustment of budgetary estimate)

水电工程实施过程中由于国家政策调整、市场价格变化以及工程设计变更等原因，对原核准设计概算进行调整所编制的以货币量表现的费用总和。调整概算是原项目核准机关出具书面确认意见或重新核准的依据，同时也是工程项目融资、投资控制管理、项目经济评价和对项目进行稽查、审计的依据。调整概算应按照静态控制、动态管理的原则，以核准设计概算为基础，根据设计变更汇总专题报告、建设征地和移民安置规划调整专项报告（含补偿费用概算调整）等复核调整概算相应项目及工程量，按核准设计概算价格水平编制工程静态投资，并在静态投资的基础上，依据工程建设期国家政策调整、市场价格变化以及工程建设实际情况，编制工程建设期价差和建设期利息。

工程调整概算文件由编制说明、相关表格（概算表、概算附表）、投资对比分析报告、附件和相关重要文件及资料等组成。

tonghang jianzhuwu

通航建筑物　(navigation structure)　用于克服集中水位落差，使船、木（竹）等通过闸、坝的水工建筑物和设施。在水电枢纽布置中，要协调好通航建筑物与相邻水工建筑物之间的关系，避免相互干扰，满足船舶（队）、木（竹）通航要求。过船、过木设施宜靠近岸边，上下游应满足引航道、集散设施布置和水流条件要求，并尽可能远离泄洪建筑物。

通航建筑物按建筑物的用途可分为过船设施和过木设施。按过坝方式有水力过坝和机械过坝，前者常借助闸室内水位升降使船、木等过坝，需消耗一定的水量；后者则借助机械运送过坝，需消耗一定的电能，基本不耗水。

过船设施　按过船方式不同分为船闸和升船机。选择船

闸还是升船机，主要是根据水头大小、通航船舶（队）的吨位以及运输繁忙程度确定。通过能力、耗水量、工程投资、机电设备制造等对选择也有一定影响。水头较低时，多采用船闸；水头较高时，可采用升船机或多级船闸。

过木设施　木材过坝有散木过坝和编排过坝两种方式，采用水力或机械传送。水力传送过坝有漂木道和筏闸两种类型。漂木道是将散木或木排通过闸孔或陡坡漂流过坝；筏闸与船闸类似，其尺寸和水流条件按过木要求设计。机械传送过坝有过木机、起重机、索道、汽车运送等过坝方式。过木机多设置在土石坝坝坡或坝岸斜坡，大型工程也有采用垂直式过木机的。过木设施除布置过木主体建筑物和机械设备外，还有停排、编排以及引航等设施。过木方式的选择，应根据过木数量、坝上下游木材流送方式（散木还是木筏）、集散方式等具体条件经技术经济比较确定。中国紧水滩水电站右岸设有木排过木机，铜街子水电站右岸设有筏闸，江西柘林土石坝坝坡上设有单根过木机。加拿大马尼克3级（Manic 3）土石坝上设有单根过木水筏道，通过架设在坝后和隧洞内的斜坡水槽将原木送到下游河道。

tonghang jianzhuwu weixiu

通航建筑物维修　(maintenance of navigation structure)

对船闸、升船机等通航建筑物进行维护修理，排除故障及隐患，恢复其技术性能及可靠性，保障运行安全的工程措施。分为船闸和升船机两部分。水工设施包括上下游闸首、闸室、输水系统、渗排水系统等；船闸金属结构包括工作闸门及启闭机、工作阀门及启闭机、事故检修门及启闭机、各类检修门、浮式系船柱等；船闸机电设备包括供电设备、给排水设备、通信设备、监控设备等；附属设施包括导航墙、靠船墩、隔流堤及引航道等。升船机形式主要有垂直式和斜坡式。其水工设施包括闸室和机房、上下游闸首、塔柱（垂直式升船机）、坡道（斜坡式升船机）等；升船机金属结构包括承船厢、挡水门和工作门及其启闭机、平衡重系统、活动桥等；升船机机电设备包括供电设备、电气传动、计算机监控及指挥系统、消防系统、通信设备、给排水设备等；附属设施包括导航墙、靠船墩、隔流堤及引航道等。

维修技术　水工设施中混凝土和金属结构的维修。（见挡水建筑物维修和水工金属结构维修）

维修方式　包括日常维护和检修。

日常维护　对通航建筑物的水工设施和运行设备进行的维护保养。

（1）水工设施的维护包括工程表面、伸缩缝止水设施、排水设施、监测设施等的养护，以及冻害、碳化与氯离子侵蚀、化学侵蚀等的防护。

（2）运行设备的维护保养一般分为例行保养和定期保养。例行保养或称日常保养，是指对主要运行设备或明确规定的巡检保养点，如闸阀门启闭机、安全锁定装置、现地操作控制柜、集中监控系统、信号指示装置等进行外观清洁、工况检查、易损件更换、润滑油加注等工作，一般每个运行班进行一次。定期保养可分为一级保养和二级保养。

一级保养是指在例行保养的基础上，着重对重要运行设备的主要部位进行的重点检查处理和调整。如对现地操作控制柜内电器的检查、接线紧固、通风散热、操作按钮和指示器件的检查和换损，液压系统的渗漏检查和处理、加注液压油、系统压力整定，水位计和各类行程开关的检查和位置调整，照明系统的检查和更换等。一级保养一般每月（或每季度）进行一次。

二级保养是指在一级保养的基础上，着重对重要运行设备和安全装置进行的详细检查、调整、调试及故障排除。如对供电系统的检查调整，电机运行工况检查和必要的绝缘测试，制动器的性能检查和必要的测试，工作闸门顶底枢等重点润滑部位的润滑状况的检查和加注润滑油脂，易淤积部位的定期冲淤和疏通，承船厢充泄水闸阀门的详细检查和易损件更换，设备锈蚀状况检查和局部处理，浮式系船柱的检查和换损，监控系统的程序检查、工业电视系统的检查和调整、不间断电源充放电等。二级保养一般3～6个月进行一次。

检修　通航建筑物的检修类别一般分为维护性修理、专项修理、岁修、大修和抢修。

（1）维护性修理是指对运行过程中设备设施暴露出来的缺陷进行常规性修理，如闸阀门止水的换损、浮式系船柱卡阻后的恢复性修理等。维护性修理一般不停航或利用例行停航保养时机进行。

（2）专项修理是指对处于故障状态或性能明显下降的设备总成、重要部件、结构部位，以及水工建筑物的较大缺陷及时进行有针对性的消缺性修理或更新改造，如液压启闭机油缸总成更换、输水阀门修理、工业电视监控系统修理、输水廊道混凝土表面破损修理、闸室结构缝破损修理等。专项修理可不停航或利用岁修时机进行。

（3）岁修是指在停航排干船闸或升船机状态下，集中对水下设备设施，或必须在停航状态下才能进行的水上设备设施的检查维修，如人字门底枢密封件的更换等。岁修一般一年安排一次，停航检修期一般不超过30天。

（4）大修是指为满足通航建筑物长期安全运行的需要，旨在恢复和提高通航建筑物水工设施、机电设备及金属结构等的技术性能而集中进行的整体性停航修理。大修内容覆盖通航建筑物的水工、机械、电气、金属结构等方面。大修周期一般为6～8年，停航检修期一般不超过100天，具体可根据实际情况确定。

（5）抢修是指当通航建筑物发生设备设施事故或重大故障，影响安全运行和不能正常使用时采取的非计划性应急修理。

tongbu xitong

同步系统　(synchronization system)

将交流同步发电机并入电力系统或使两个电力系统联网并列运行的装置。多台发电机、多个电力系统相互连接并列运行，不仅可以提高供电可靠性，而且可以使负荷分配更加合理，减少电力系统备用容量，达到经济运行的目的。

系统同步是将连接两侧电源的断路器进行合闸，从而实现并网运行的过程。断路器的合闸条件：只有当待并双方以相同的电角速度旋转，彼此间的相角差不超过允许的极限值，归算电压近似相等时，才允许相互连接并列运行。同步点选择：发电机断路器、变压器高压侧断路器、与电源相连接的各侧断路器、母线分段断路器、母线联

络断路器、线路断路器。同步方式有准同步和自同步两种。

准同步方式 采用准同步方式时，发电机并列前已励磁，在发电机的电压、角速度（或频率）、相角分别与投入系统的电压、角速度（或频率）、相角相同（或接近相同）时，合上发电机断路器完成同步并列操作。这种方式的投入瞬间，发电机的冲击电流为零或很小，不至于降低电力系统电压。但准同步装置较复杂，同步并列过程较长，尤其在电力系统事故而频率和电压急剧变化时，同步并列过程更长。如果由于某些原因造成非同步并列，严重时会导致发电机损坏，因此要严格控制准同步的条件。

每台水轮发电机装设一台自动准同步装置，作为正常同步方式；同时设置一套手动准同步装置，作为辅助同步方式。对于开关站的各同步点，采用捕捉同步方式，合用一台多对象准同步装置，同时配置手动准同步装置。

准同步条件　待并双方电压相等、频率相同、相位相同。实际上要绝对准确地达到这些要求是不可能的，在实际并列时相位、频率和电压往往均有一些差值，只是不应该超出允许范围。为避免断路器非同步合闸，设置同步闭锁继电器。

手动准同步　待并一方所有并列操作，包括转速调节、电压调节和断路器合闸均由运行人员手动进行。为了进行手动准同步，装设了选择器件用来预先选定有同步并列任务的断路器，并装设同步表一只及检测断路器两侧并列时电压和频率的电压表和频率表各两只（也有只装电压差表和频率差表各一只）或者装设一只组合式同步表，用来分别检测待并双方之间的相位、电压和频率。等到待并双方的相位、电压、频率接近相等时，手动合上选定的断路器，完成同步并列。

自动准同步　所有同步并列操作均由自动装置来完成。自动准同步装置的功能是当电压差、频率差超过允许范围时，能自动发出调节电压和频率的指令，促使同步条件得到满足。并且，在满足同步条件后，比相角差为零时提前一段时间发出合闸脉冲，提前的这段时间力求等于断路器的合闸时间，使得断路器合闸瞬间正是待并双方相角差为零的时刻，以期在断路器合闸瞬间发电机冲击电流最小。按提前发合闸脉冲的方式，自动准同步装置分为恒定导前时间和恒定导前相角两种类型。前者使提前发合闸脉冲的时间与断路器的合闸时间一致，不受滑差角速度的影响；后者是在某一恒定导前相角下发出合闸脉冲，其导前时间将随滑差角速度的变化而变化，只适用于合闸时间较短的断路器，由于该方式结构简单，多用在线路上同步并列。恒定导前时间的自动准同步装置得到广泛采用。

自同步方式 20世纪80年代前中国100MW以下的机组曾广泛采用自同步方式。自同步方式是在发电机组转速升高到接近电力系统转速时，将未加励磁的发电机投入电力系统，然后加上发电机励磁，将发电机拉入同步，因此并列过程短，尤其在电力系统事故低频率、低电压的情况下，能使发电机迅速并入电力系统，但在发电机投入电力系统瞬间，冲击电流大，使电力系统电压降低较多。

简史 随着技术的进步，同步装置，尤其是自动准同步装置得到不断改进和更新。早期的自动准同步装置由电磁元件、二极管整流元件等组成。电子技术的迅速发展、晶体管和集成电路组成的自动准同步装置已替代了早期的产品，20世纪70年代国际上开始采用计算机同步。80年代以来，中国计算机同步的技术也得到迅速发展，可以设置独立的计算机同步装置，配相应的数据采集和输出部件；也可附设在机组自动控制的现地控制单元内，作为它的一个子系统，配上适当的数据采集和输出部件来实现同步并列。计算机同步具有快速、准确的特点，中国已经成批生产了性能成熟的微机自动准同步装置，得到了广泛应用。

很多水轮发电机采用快速跟踪同步方式，在水轮发电机组起动过程中，通过励磁调节器的作用使发电机电压跟踪系统电压，得到待并双方电压差为零或接近零；通过微机调速器使水轮发电机组的频率和相角跟踪电力系统的频率和相角，使得待并双方频率差和相角差为零或接近零，以得到最佳的同步条件。

由于自同步方式对机组和电力系统的冲击影响，中国已很少采用。

Tongbai Choushui Xuneng Dianzhan

桐柏抽水蓄能电站

（Tongbai Pumped Storage Power Station）　位于中国浙江省天台县，距天台县城约7km，离杭州、上海的直线距离分别为150km和250km。电站装机容量1200MW，以2回500kV的电压接入华东电网，在系统中承担调峰填谷、调频、调相、事故备用的作用。

枢纽布置 枢纽工程由上水库、下水库、水道系统、厂房等组成，见图1。

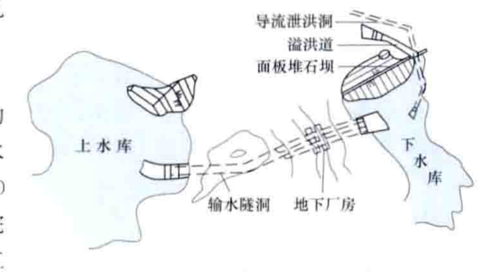


图1　桐柏抽水蓄能电站枢纽布置图

上水库　利用已建成的桐柏水库。水库建于1960年，1977年完成大坝加高工作，经局部加固处理后改建为桐柏抽水蓄能电站上水库，水库本身的流域面积为$6.7km^2$，20世纪六七十年代通过不断开洞挖渠，集水面积扩大到$60.9km^2$，多年平均入库流量$1.71m^3/s$，见图2。



图2　桐柏抽水蓄能电站上水库

桐柏水库改为抽水蓄能电站上水库后，水库完全供抽水蓄能电站使用，水库的特征水位基本保持不变。选用正常蓄水位396.21m，死水位376.00m，200年一遇设计洪水位398.06m，1000年一遇校核洪水位398.54m。总库容1146.8万m^3，发电有效库容1041.9万m^3，其中备用库容

74.04 万 m^3，死库容 104.9 万 m^3，正常运行时水位日变幅为 17.0m。改建为抽水蓄能电站上水库后，对原主、副坝做适当加固。原有主、副坝为均质土坝，最大坝高 37.15m，坝体加固措施是在上游坝坡增设反滤层、过渡层和压坡体。高程 384.28m 以下坡度为 1∶4.0，384.28m 以上坡度为 1∶3.2。下游坝坡，在高程 386.78m 以下放缓到 1∶2.6，以上仍保持为 1∶2.0。

下水库　位于始丰溪支流茅溪上支沟百丈坑上。设计洪水流量 361m^3/s，校核洪水流量 496m^3/s，利用设置的导流泄洪洞，宣泄天然洪水，使电站在出现 20 年一遇以下频率的洪水时，电站仍可按电网要求正常运行。大坝为混凝土面板堆石坝，最大坝高 68.3m，坝顶长 424m，上游坝坡坡度为 1∶1.4，下游坝坡坡度平均为 1∶1.5。溢洪道为坝身开敞式自由溢流，全长约 200m，堰顶高程 141.90m；导流泄洪洞布置于右岸。

水道系统　采用一洞二机斜井式布置方案。主洞洞径 9m，两条主洞的长度分别为 592.39m 和 578.42m。岔管为钢筋混凝土结构，后接高压钢支管，支管内径 5.5m，钢衬长度 107.6～141.9m。尾水隧洞按单机单管布置，共 4 条，洞径 7m，洞长 368.64m。上下水库进出水口均采用岸坡竖井方案。

厂房　地下厂房为尾部开发方式，厂区布置有主、副厂房洞，主变压器洞，母线洞，进厂交通洞，出线洞等。主变压器洞位于主、副厂房洞下游，安装场和副厂房分别布置于洞室的左、右端部。主、副厂房洞的尺寸为 170.3m×24.5m×53.8m（长×宽×高）。主厂房内安装 4 台单机容量为 300MW 的可逆式水泵水轮机组。500kV 开关站选用敞开式设备，布置在下水库进出水口的上游侧。2 回 500kV 出线。

水轮机为立轴单级混流可逆式，额定出力 306MW，转轮直径 5.8m，转速 250r/min，吸出高度－4.6m，水轮机工况净水头为 283.7/230.2m（最大/最小），水泵工况扬程为 288.7/237.5m（最大/最小），水轮机额定水头 244m。

发电机为立轴三相空冷可逆式同步电机，额定容量 300/326MW（发电机/电动机），主变压器为三相双绕组强迫油循环风冷户外式，额定容量 360MV·A，每台水泵水轮机前设 1 台直径为 3.1m 的球阀，额定工作压力为 6MPa，最高净水头 345.2m。

工程施工　2005 年 12 月底第一台机组发电，2006 年 12 月 4 台机组全部投产发电。

主要工程量：土石方明挖 199.97 万 m^3，石方洞挖 65.36 万 m^3，混凝土浇筑 28.45 万 m^3，金属结构及压力钢管制作安装 4974.6t。

设计单位　中国水电顾问集团华东勘测设计研究院。

toubiao baojia

投标报价　(tender price; bid price)　投标人就招标工程项目（标的）以订立合同为目的，按招标文件要求编制并提交招标人的标的价格（即要约），是评标期间被评审的主要内容之一。针对同一标的，除招标文件要求提交备选标的外，一个投标人只能递交一份投标报价。

投标报价由投标人自行编制或委托具有相应资质的造价咨询单位编制。编制依据为：招标文件（包括商务条款，技术要求和标准、图纸与工程量清单等），投标人技术文件，当前价格水平，行业或企业定额等。投标报价编制方法一般采用制造成本法，包括直接成本（人工、材料、施工机械费用成本）和间接成本，并在总成本中加上必要的加价，包括投标人的总部管理费、工程风险（不可预见）分摊费、利润、税金等。人工、材料、施工机械消耗量由投标人根据招标工程条件，结合投标人资源、技术条件与方案参考企业内部定额分析确定，或参考行业定额分析后浮动。间接成本根据投标人管理水平和预计投入分析确定，其中利润根据投标人对工程获利的期望值分析确定。投标报价整体水平应具有竞争性。在中国，低于成本或者高于招标文件设定的最高投标限价的投标报价，在评标中将被否决。

touzi gusuan (shuidian)

投资估算（水电）　(preliminary estimate of hydropower project investment)　水电工程预可行性研究设计阶段预测的工程造价。是预可行性研究设计阶段进行项目国民经济初步评价及财务初步评价的依据，是国家为选定近期开发项目做出科学决策和批准进行可行性研究设计的重要依据。按照国家和行业现行的政策法规、规程规范、定额标准，依据预可行性研究报告估算的设计工程量，采用编制年价格水平（人工、材料、施工机械使用费以及设备价格等）编制形成以货币量表现的费用总和。其中主要工程项目投资采用工程量乘工程单价计算，次要工程项目投资一般采用类比或单位造价指标进行估算。

投资估算文件由编制说明、估算表、估算附表和附件组成。投资估算的计算精度高于投资匡算。

touzi kuangsuan

投资匡算　(rough estimate of investment)　水电工程规划阶段预测的工程造价。是河流（河段）规划或抽水蓄能电站选点规划的重要内容，也是进行规划方案比选的重要依据之一。按照国家和行业现行的政策法规、规程规范、定额标准，依据规划项目的工程特征参数、枢纽工程规划方案、水库淹没指标和其他影响因素初步匡算的设计工程量，采用编制年价格水平（人工、材料、施工机械使用费以及设备价格等）编制形成以货币量表现的费用总和。其中主要工程项目投资采用工程量乘工程单价进行计算，次要工程项目投资采用单位造价指标或占主要工程项目投资百分比的方法进行匡算。

投资匡算文件由编制说明、匡算表和匡算附表组成，对投资计算的精度要求相对较低。

toushuilü

透水率　(permeation rate)　通过钻孔压水试验测得的试段岩体透水性指标。透水率的单位为吕荣（Lu）。1Lu 的定义为当试验段压力为 1MPa 时，每米试段水或浆液的压入流量为 1L/min。

钻孔压水试验是了解岩体渗透性能的一种常用试验方法，在钻孔钻进过程中或钻孔钻进结束后，用栓塞将某一长度的孔段与其余孔段隔离开，再用不同的压力向试验段内送水，测定其相应的流量值，据此计算岩体的透水性指标。

中国从20世纪50年代中期开始，基本上采用1952年苏联推荐的方法。1978年颁发的SDJ 16—1978《水利水电工程钻孔压水试验规程》对苏联的方法进行了较大的简化，把多个阶段改为单阶段，水位观测和流量观测稳定时间缩短，测得的岩体渗透性指标用单位吸水量（ω）表示。1992年颁发的SL 25—1992《水利水电工程钻孔压水试验规程》推荐采用国际上比较通用的吕荣试验。透水率（q）与单位吸水量（ω）之间，在数值上大致相当于100倍的关系，即1Lu相当于ω值的1/100。

吕荣试验方法是1933年法国M. 吕荣（M. Lugeon）首先提出的，当时是采用1MPa的压力进行一个阶段试验。世界各国压力阶段的规定不尽一致，多数国家是3级压力5个阶段，美国垦务局采用5级压力8个阶段。日本规定为5级压力9个阶段。中国标准DL/T 5331—2005《水电水利工程钻孔压水试验规程》规定为3级压力5个阶段。

吕荣试验方法的主要特点：①压力大，最大压力为1MPa，多阶段循环试验，了解在不同压力以及最大压力前后同一压力下岩体透水性能的变化，分析岩体的渗透特性；②能获得多组数据，可以互相校核，使成果更加可靠；③在整理试验成果时，强调以试验时的实际情况为依据，舍弃了片面追求流态上合理的要求；④每阶段的试验时间较短，一般为10min。

透水率按下式计算

$$q=\frac{Q_3}{l}\times\frac{1}{p_3}$$

式中q为透水率，Lu；Q_3为第三阶段的计算流量，L/min；l为试段长度，m；p_3为第三阶段的试验压力，MPa。

透水率是评价岩体渗透性能和作为防渗帷幕设计的基本依据。GB 50287—2006《水力发电工程地质勘察规范》依据透水率（q）对岩土渗透性能的分级见表。

岩土渗透性分级

渗透性分级	透水率 q（Lu）	渗透性分级	透水率 q（Lu）
极微透水	$q<0.1$	中等透水	$10\leqslant q<100$
微透水	$0.1\leqslant q<1.0$	强透水	$q\geqslant100$
弱透水	$1.0\leqslant q<10$	极强透水	

DL 5108—1999《混凝土重力坝设计规范》规定，防渗设计标准为：①坝高在100m以上时，q为1～3Lu；②坝高在100～50m之间时，q为3～5Lu；③坝高在50m以下时，$q=5$Lu。

抽水蓄能电站或水源短缺水库的大坝防渗帷幕的标准应适当提高。

Tukuluyi Shuidianzhan

图库鲁伊水电站 (Tucurui Hydropower Station)

位于巴西北部亚马孙地区托坎廷斯（Tocantins）河下游，距贝伦港320km，见图1。电站总装机容量8125MW，多年平均年发电量228亿kW·h，主要为开发当地铁矿和铝矾土等资源就近供电。电站分两期建设，一期装机容量4000MW，二期装机容量4125MW。采用500kV超高压输电。

水文和水库特性 托坎廷斯河与世界最大的亚马孙河在



图1 图库鲁伊水电站

同一地区注入大西洋。该流域属赤道附近的热带雨林区，森林茂密，平均年降水量1500～2000mm。坝址以上流域面积75.8万km^2，多年平均年径流量3470亿m^3，多年平均流量11000m^3/s，实测最大流量68400m^3/s。设计洪水流量100000m^3/s。正常蓄水位72.00m，库容455亿m^3，调节库容320亿m^3，水库面积2430km^2。

工程地质条件 坝址基岩为变质沉积岩，河床中顺河方向有区域断层。

枢纽布置 枢纽工程由大坝、泄水建筑物、厂房、通航建筑物等组成，见图2。

大坝 主坝为斜心墙堆石坝，坝顶高程78.00m，最大坝高98m、长1310m，右岸土坝长2611m。河床左侧为混凝土溢流坝段，坝顶高程77.5m、长580m，最大坝高86m。溢流坝段的左侧为初期厂房坝段，长400m。左岸垭口建土坝长2330m。挡水前沿总长8231m。

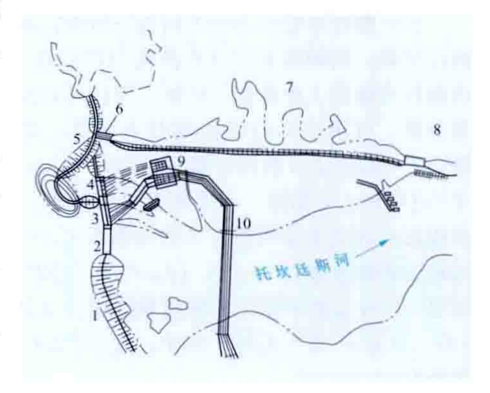


图2 图库鲁伊水电站枢纽布置图
1—河床堆石坝；2—溢流坝段；3—初期厂房坝段；4—二期厂房坝段；5—左岸土坝；6—上级船闸；7—错船道；8—下级船闸；9—开关站；10—输电线

泄水建筑物 溢流坝设23孔弧形闸门控制的溢流孔，每孔宽20m、高21m，在正常蓄水位时泄洪100000m^3/s，超高至74.00m水位时可泄洪110000m^3/s。

厂房 一期厂房布置于溢流坝段左侧，二期厂房布置在初期厂房坝段左侧。一期厂房内安装12台混流式水轮发电机组。压力钢管直径10.4m。水轮机转轮直径8.1m，转速83.7r/min，额定水头为60.8m时出力为330MW，流量为576m^3/s。发电机额定容量350MV·A，功率因数0.95，频率60Hz，电压18kV，变压器容量350MV·A。厂房内还安装2台厂用机组，每台机组容量20MW。二期安装11台单机容量为375MW的机组。

通航建筑物 左岸垭口土坝上布置有两级船闸，由长5643m、宽140m的错船航道衔接。两级船闸的闸室净宽33.0m、长210m，提升高度分别为37.8m和35.0m。

工程施工 一期工程于1974年开始施工准备，1975年11月主体工程开工，1984年发电，1990年完成。二期工程包括建设二期电站和完建船闸工程，1998年开工，电站于2007年完工，船闸工期滞后。

主要工程量与投资：一期工程开挖土方2160万m^3，开挖石方2290万m^3，填筑土方5160万m^3，填筑堆石1980万m^3，浇筑混凝土600万m^3，工程投资55亿美元。二期工程开挖量2285万m^3，土石方3794万m^3，常规混凝土1383万m^3，碾压混凝土28.8万m^3，工程总投资13.5亿美元。

tu de gongcheng fenlei

土的工程分类 (engineering classification of soil)

将自然界的土按工程性质分类，以定性了解其工程性质的方法。土的类别根据土的物理性指标和目测鉴定。分类类别和命名因工程目的不同而不同，采用较广泛的有统一分类法、公路土工程分类法和建筑地基土分类法，水利水电行业基本采用统一分类法。对于黏性土，常使用的分类方法还有三角坐标分类法和塑性指数分类法等。

土的物理性指标 包括反映土的固有性质的颗粒级配、土粒比重、界限含水率（液限、塑限、缩限）、塑性指数、活动度等指标，以及反映土的密实和含水状态的密度（或重度）、含水量、液性指数、饱和度、相对密度等指标。颗粒级配、液塑性（液限含水量、塑限含水量、塑性指标）等常被用作土的工程分类的依据。

（1）颗粒级配。土中不同直径的颗粒质量占土粒总质量的百分数，用颗粒大小分布曲线和粒径累计级配曲线表示。由曲线可确定土中的砾、砂粒、粉粒和黏粒等各粒组的质量百分数。应用较广的粒组划分方法是：粒径60～2mm为砾；2～0.075mm的为砂粒；0.075～0.005mm为粉粒；小于0.005mm为黏粒。土中所含粒组越多，则级配越好。评价级配好坏的主要指标为不均匀系数$C_u=d_{60}/d_{10}$，其辅助指标为曲率系数$C_c=d_{30}^2/(d_{60}d_{10})$，式中$d_{60}$、$d_{30}$、$d_{10}$为粒径，小于此粒径的土颗粒质量分别占土粒总质量的60%、30%、10%。在土石坝工程中，常以5mm作为砾和砂的分界粒径。

（2）液塑性。在黏性土水分逐渐减少的过程中，土从流态变成可塑状态，继而变成不可塑状态的两个界限含水量分别为液限含水量w_l和塑限含水量w_p，两者统称阿太堡(Atterberg)界限。液限和塑限含水量之差为塑性指数I_p。土中黏粒含量和活动度越高，则液限和塑性指数越大。土的天然含水量与塑限含水量之差与塑性指数的比值为液性指数。

统一分类法 根据土中的主要粒组，级配及液限、塑性指数和有机质含量进行分类。分类原则是：①土中砂粒和砾之和的含量大于50%的称粗粒土，粉粒和黏粒含量之和大于或等于50%的称细粒土；②粗粒土按砂粒和砾的含量和级配分为级配良好或不良的砾和砂砾、级配良好或不良的砂或砾质砂、粉土或黏土质砾、粉土或黏土质砂等8类；③细粒土按液限、塑性指数和有机质含量分为无机粉土、弹性粉土、中低塑性黏土、高塑性黏土、有机低塑性粉土、有机中高塑性黏土、泥炭等7类。这15类土经常规方法压实后的抗剪强度、压缩性、加州承载比及易施工性等特性，可通过颗粒分析和液塑限等简单试验作出定性评价。甚至可以在现场通过目测、湿土在手掌中的摇振反应，以及干土块在手指间的压碎强度等简捷方法鉴别土类，从而定性估计土料性质和对土料进行初选。

公路土工程分类法 按土的承载车轮能力、遇水膨胀、干缩、冻胀等筑路材料性质而分类的方法。将粉粒和黏粒总含量等于或小于35%的土称为粒状土料，而含量大于35%的称为粉细土料。前者按土中含砾量分为3类，后者按液限含水量和塑性指数分为4类。从粗到细称为A1～A7，共7大类。

建筑地基土分类法 对碎石土和砂土，按粒径和密实度分类，并与估计地基土的承载力相联系，密实度越高，则承载力越高。对于黏性土，按塑性指数和液性指数分类，塑性指数和液性指数越大，则承载力越小。

参考书目

Singh A. Soil Engineering in Theory and Practice. New York: Asia Publishing House, 1976.

tu de gujie yu chenjiang

土的固结与沉降 (consolidation and settlement of soil)

固结是饱和土体在应力作用下，水从孔隙中排出，压缩变形量和密度随时间增长的全过程。沉降是在应力作用下土体发生压缩或剪切变形而引起的竖向位移。在饱和土固结过程中，开始作用的应力全部由孔隙水所承担，随着孔隙水的排出和体积的压缩，土中超静孔隙水压力消散，粒间有效应力相应增长，体积压缩，直至超孔隙水压力全部转化为有效应力为止。固结的快慢取决于土的渗透性和排水条件，透水性低、排水途径长则固结过程慢。所有粗粒土渗透系数很大，固结过程极快，而对饱和或接近饱和的细粒土则需考虑固结过程中其力学性质的相应变化。

土的固结 主要包括：

（1）主固结与次固结。主固结是超孔隙压力消散和有效应力增长的过程。主固结结束后，在有效应力基本不变的情况下，由于土骨架蠕变而引起的缓慢体积压缩过程称为次固结。对软黏土、淤泥等土层，次固结引起的沉降量可占较大比重，不可忽视。

（2）先期固结压力和超固结比。土体内某点在历史上曾经受过的最大有效垂直压力称为先期固结压力p_c，可以从压缩试验的e-$\log p$曲线上求得。它和该点现有的有效垂直压力p_0之比称为超固结比OCR。$OCR=1$为正常固结，表示土体在上覆土重压力下正好完全固结；$OCR>1$为超固结，表示土体在历史上曾承受过的最大有效压力超过现存的上覆土重压力；$OCR<1$为欠固结，表示土体在上覆土重压力下尚未完全固结。这3种不同固结历史的土的固结和压缩特性有很大差别。

（3）固结理论。用于进行土体在应力作用下孔隙水压力消散过程的计算。常用的是K.太沙基（K.Terzaghi）的单向固结理论，它假设：①土是均质、饱和的；②土骨架和水是不可压缩的；③固结过程中土的渗透系数k和压缩系数a之比为常数；④渗流服从H.P.G.达西（H.P.G.Darcy）定律；⑤载荷瞬时施加；⑥只能沿垂直方向单向排水和发生压缩。由此导出固结微分方程

$$C_v\frac{\partial^2 u}{\partial z^2}=\frac{\partial u}{\partial t} \quad (1)$$

$$C_v = k(1+e_1)/(\gamma_w a) \quad (2)$$

方程（1）的解为

$$u = f(T_v, z) \quad (3)$$

$$T_v = C_v t/H^2 \quad (4)$$

式中 C_v 为固结系数；u 为研究点的超静水压力；z 为研究点在排水面以下的深度；t 为瞬时加载后经历的时间；e_1 为土层固结前的初始孔隙比；γ_w 为水的容重；T_v 为时间因子；H 为最大排水距离。用式（3）解出某一时刻 t 时 z 深度处某点的孔隙水压力，它与固结前的起始孔隙水压力之比为 t 时刻该点的固结度，再根据各点的固结度算出整个土层的平均固结度。

M. A. 比奥（M. A. Biot）于 1941 年提出了三维固结理论。该理论考虑了土体三维变形与孔隙压力的相互作用，将变形和渗流耦合而得出精确解。现代计算技术和电子计算机技术的发展，使得三维固结理论可以应用于工程实践。

土体沉降　土体在应力作用下发生的垂直变形，可以分为瞬时沉降、主固结沉降和次固结沉降。饱和黏性土瞬时沉降为加荷瞬间因剪切变形而引起的沉降，主固结沉降和次固结沉降则相应于主固结和次固结过程中发生的沉降。一般黏性土层以主固结沉降为主，砂性土层固结很快，瞬时沉降和主固结沉降难以区分。堆石等粗颗粒材料的沉降通常表现为瞬时沉降，但随着应力水平的增加或外部条件的变化（浸水湿化等），颗粒的破碎和级配调整将产生附加沉降变形。计算的沉降量和不均匀沉降必须小于各类建筑物的允许值，以保证安全和正常运行。

最常用的沉降计算方法是基于弹性理论和一维变形假设的分层总和法，即土层的总沉降量 S 等于各分层沉降量 S_i 之和

$$S = \sum_{i=1}^{n} S_i = \sum_{i=1}^{n} \frac{e_{1i} - e_{2i}}{1 + e_{1i}} H_i = \sum_{i=1}^{n} \frac{a_i}{1 + e_{1i}} (p_{2i} - p_{1i}) H_i \quad (5)$$

其中　$a_i = -\Delta e/\Delta p = (e_{1i} - e_{2i})/(p_{2i} - p_{1i})$

式中 e_{1i}、e_{2i}、p_{1i}、p_{2i} 分别为 i 层土起始和终了时的孔隙比和垂直有效压力，由压缩曲线得出；H_i 为 i 层土的厚度；a_i 为 i 层土的压缩系数。由于土体沉降一般具有三向性质，不考虑侧向变形的分层总和法计算结果往往与实测值有较大差别。较为精确的沉降计算通常采用有限元法等数值方法。

tu de lixue xingzhi

土的力学性质 (mechanical properties of soil)

土在外力作用下骨架的应力、应变、强度和时间等相互关系（亦称本构关系）和土中孔隙水、气的变化特性。土是碎散矿物颗粒的集合体，随颗粒间的滑动、滚动、重新排列和压碎而使土体变形和破坏，其应力、应变、强度关系远较其他工程材料复杂。土的强度是土在外力作用下达到破坏时的应力，破坏形式包括剪切破坏、拉伸破坏等。土的应力-应变关系决定土工建筑物和地基基础的位移、沉降及土体内的应力分布；而土的强度则控制地基承载力及堤坝、基坑和天然土坡等边坡稳定性。土的力学性质还包括土的渗透性（见渗流）及动力性质（见土动力学）。土的力学性质指标主要是通过各种室内土工试验确定，也可用原位测试方法确定。

土的应力-应变关系　具有非线性、弹塑性、剪胀（缩）性和对影响因素的敏感性等主要特点。图 1 为常用的三轴试验和单向压缩试验中得出的两种应力-应变关系曲线。三轴试验是在一定的周围压力下施加轴向载荷直至试样破坏，试样可以发生竖向、侧向和体积变形。

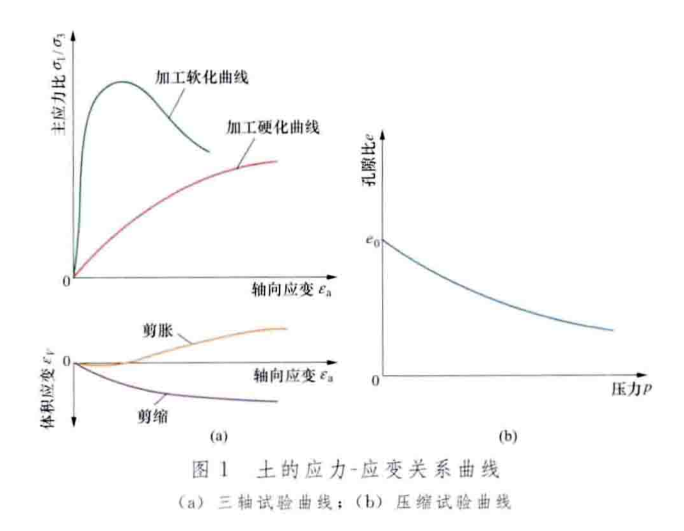


图 1　土的应力-应变关系曲线

(a) 三轴试验曲线；(b) 压缩试验曲线

非线性　土在荷载作用下的应力与应变间呈明显的非线性关系。三轴试验中，松砂或正常固结土的应力-应变关系为单调增加，这种类型的曲线称为加工硬化曲线；而密砂或超固结土的应力-应变关系是有峰值的曲线，这种类型曲线称为加工软化曲线。

弹塑性　表现为土体变形时，除可恢复的弹性变形外，还存在不可恢复的塑性变形。随着变形加大，塑性变形在总变形中的比例增加。对加工硬化曲线，其屈服应力随应变增加而加大；对加工软化曲线则相反。

剪胀（缩）性　土在纯剪切力作用下体积将发生变化：松砂或正常固结土的体积将收缩；而密砂或超固结土的体积开始略收缩，随即膨胀。这是土区别于其他工程材料力学性质的重要特征之一。

对影响因素的敏感性　影响土的应力-应变关系的主要因素有应力水平、应力路径、应力历史。土的各向异性与结构性、中主应力、主应力轴旋转、加荷速率等因素也影响着土的应力-应变关系。

（1）应力水平。一般有两层含义：一是指围压绝对值的大小，二是指剪应力与剪切强度之比。三轴剪切试验时的应力-应变关系的初始切线模量和强度值随周围压力加大而增加，有时甚至应力-应变曲线的线型也会随之而改变。

（2）应力路径。土体中某单元在外载荷作用下的应力变化过程在应力空间的轨迹。土的应力-应变关系与应力状态和达到这个应力状态的应力路径有关。

（3）应力历史。在测试土样的应力-应变关系之前，试样已经受的各种应力状态。土有记忆其应力历史的特性。现场土样在历史上受到过的最大压力（p'_c）小于、等于或大于目前土的上覆压力（p'_0）时，分别称为欠固结土、正常固结土和超固结土。p'_c 与 p'_0 的比例值称为超固结比，它对土的应力-应变关系的影响很显著。

土的抗剪强度　土在外力作用下达到剪切破坏时的剪应力。破坏应力与应力状态有关，根据应力-应变关系确定。

破坏面上的抗剪强度 τ_f 是该面上法向应力 σ_n 的单调函数，$\tau_f = f(\sigma_n)$，将它画在 σ_n-τ 应力空间，得到的曲线称为莫尔(O. Mohr)强度包线，在一定应力范围内，可用库仑(C. A. Coulomb)公式 $\tau_f = c + \sigma_n \tan\varphi$ 近似表示(见图2)。c、φ 为抗剪强度指标，分别称为土的黏聚力和内摩擦角。粗颗粒土的强度包线常呈现明显的非线性的 τ-σ 关系，通常用非线性方程表示。中主应力、土的各向异性等对土的强度有明显影响。

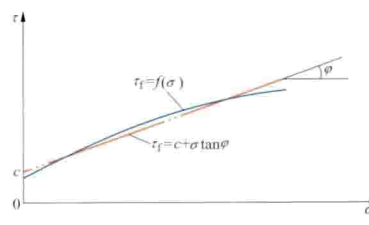


图2　莫尔-库仑强度包线

参考书目

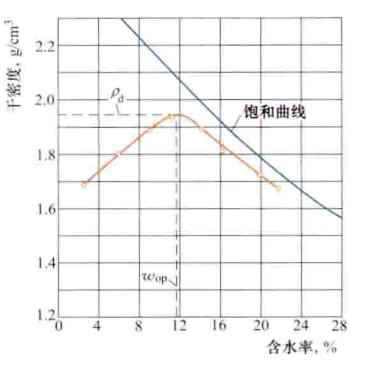
黄文熙．土的工程性质．北京：水利电力出版社，1983.

tu de yashi

土的压实 (soil compaction)

在松散土上施加重复荷重，使土颗粒间的孔隙减小、密度增加的工程措施。土压实后，强度增加，压缩性和渗透系数减小，抗渗性能提高，工程性质得到改善。早在远古时代，人类已开始用土作为建筑材料，在实践中逐步认识到土压实的重要性。随着土坝建设的发展，土的压实技术逐步提高。1933年美国工程师R. R. 普罗克特(R. R. Proctor)总结了美国修建土坝的经验，全面系统地阐明了土的压实原理，提出试验室击实试验方法，自此土的压实理论在填土建筑物的设计和施工中得到普遍应用。

土的压实性　黏性土的压实干密度与含水率间有密切关系。将一定的黏性土制备成不同含水率的试样，用一定的压实方法和压实功能进行击实试验，得出含水率与干密度的关系曲线，亦称压实曲线，干密度的峰值称最大干密度 ρ_d，相对应的含水率称最优含水率 w_{op}(见图)。对于同一种土和相同的击实方法，随击实功能的增加，最大干密度增加，最优含水率减小。



黏性土的压实曲线

最大干密度 $\rho_d = 1.96\text{g/cm}^3$，最优含水率 $w_{op} = 11.6\%$

无黏性土(如能自由排水的砂和砂砾石)压实干密度虽也与含水率有关，一般不存在最优含水率。通常，完全干燥或饱和时压实干密度最大，而中间潮湿状态明显降低。一般粒径小于0.075mm的细粒含量小于5%～12%的能自由排水的无黏性土，需作相对密度试验，用振动法求其最大密度。

压实功能　土的最大干密度、最优含水率与压实功能有关。各国击实试验采用的功能不尽相同，主要有标准击实(相当于标准普氏)和重型击实(相当于修正普氏)两种，其击实功能分别为 592.2kJ/m^3 及 2684.9kJ/m^3，可按不同压实度要求和碾压机具的功能选用。

压实机械　原始的压实工具有木夯、石硪等。现代压实机械向多品种、高效率发展。以静重压实为主的有平碾、羊足碾、凸块碾、气胎碾等。利用冲击荷重压实的有冲击碾、夯板、电动夯、爆炸夯等。利用振动压实的有振动碾、平板振动器等。振动碾又可分为振动平碾、振动羊足碾、振动凸块碾等。应根据土石料的不同性质，选择适宜的压实机械。一般黏性土、砾石土可采用羊足碾、凸块碾、气胎碾、振动凸块碾。砂或砂砾石可采用振动平碾、气胎碾、夯板。堆石可采用振动平碾或冲击碾。

现场碾压试验　用于确定土石料的填筑标准和施工时的压实参数。(见土石坝材料现场试验)

tu de yuanwei ceshi

土的原位测试 (in-situ soil test)

为测定原位土的工程性质所进行的现场试验。土的性质测定有采取土样作实验室试验和现场原位测试两种基本方法，两者是相互补充的。前者经过取样、封装、运送、储存、制样、试验等过程，土样将受到不同程度的扰动，特别是砂质土，采取原状土样很困难，因此往往要用原位测试方法确定土的力学性质以及鉴定和划分土层。有些原位测试方法可减少因采取土样导致的应力释放影响，有些方法还可用于填土的质量检测。常用的原位测试方法有载荷试验、标准贯入试验、十字板剪切试验、静力触探、动力触探、旁压试验、跨孔波速试验等。此外，用物探法进行土层勘探、用抽水注水试验测定土层渗透性、混凝土板抗滑试验、现场大型剪切试验、钻孔中扁千斤顶试验、放射性同位素测定土的密度及含水量以及桩基试验等，从广义上也都属于土的原位测试。原位测试的推广和改进对岩土工程有重要作用，受到了各国岩土工程界的重视，方法趋向多种化，操作和记录系统趋向自动化。

载荷试验　将一定尺寸的载荷板放在试坑或钻孔底面上，逐级加载，测定载荷和垂直位移的关系曲线，确定地基土的变形特性和承载力。载荷试验按测试深度分为浅层与深层两种；按板的形状分为平板与螺旋板；按载荷性质分为静力和动力。常用的是浅层平板载荷试验。根据试验成果可评价地基土的允许承载力，计算均匀地基土的变形模量，确定非自重湿陷黄土的湿陷起始压力等。

标准贯入试验　用(63.5±0.5)kg的穿心锤，以(0.76±0.02)m的自由落距将标准贯入器先打入土中0.15m，然后记录继续打入0.30m所需的锤击数，即为标准贯入击数 N。根据 N 值的大小可判断砂土的密实程度或黏性土的稠度，用来确定地基土的允许承载力、评定砂土液化势和估计单桩承载力，并可确定土层剖面，采取扰动土样进行物理性质试验。

十字板剪切试验　用插入软黏土的十字板头，以一定速率施加扭转力矩，按十字板内土柱剪断时的扭矩换算其抗剪强度值，该值相当于不排水强度内摩擦角 $\varphi_u = 0$ 时的黏聚力 c_u 值。本试验方法适用于测定饱和软黏土的不排水抗剪强度和残余抗剪强度。

静力触探　将圆锥形探头按一定速率匀速压入土中，同时量测由锥头阻力和侧壁摩阻力形成的贯入阻力。可用于划分土层，评价地基土的工程特性，探找桩基持力层，预估沉

桩可能性和单桩承载力，并可用于检验人工填土密度及地基加固效果。静力触探可以迅速连续地反映土层变化特性，探头装上特殊传感器可同时测量孔隙水压力。对于卵石层及夹有较多砖瓦、贝壳、砸石的土层，静力触探不适用。

动力触探　利用一定的落锤能量，将与探杆连接的圆锥形探头打入土中，根据打入的难易程度（以贯入度或贯入阻力表示）判断土的工程性质。一般用于确定各类土的允许承载力，查明土层的均匀程度；确定桩基持力层的位置和单桩承载力。动力触探分为轻型、重型和超重型 3 种。轻型适用于黏性土、素填土；重型用于中、粗砾砂和碎石土；超重型适用于卵石、砾石类土。

旁压试验　分预钻式及自钻式。一般采用预钻式，在预先钻就的钻孔内放入可向四周扩张的圆柱形旁压器，加液压使弹性膜对孔壁施加压力，使土体产生变形。根据旁压曲线可确定地基土的原位压力、强度指标、地基承载力和旁压模量。自钻式旁压仪是借圆柱形旁压器下端的钻刃用循环液冲孔或其他方法将旁压器沉置于钻孔中拟测试的位置进行试验。它适用于淤泥、砂等难以保持钻孔孔壁稳定的土层，其结构及操作较复杂。

跨孔波速试验　在按直线排列的 3 个或 3 个以上的钻孔内，在振源孔激振，在检波孔内接收直达波，测定压缩波和剪切波在地层中的传播时间，根据传播距离计算地层中波速及各项动力参数。

tudonglixue

土动力学　(soil dynamics)　研究在各类动载荷（冲击载荷、周期载荷和不规则循环载荷）作用下土的性状，土体的动力反应，结构物土基和土工建筑物动力响应、变形和稳定问题的一门学科。研究的主要内容有土的动力特性、土体动力反应分析和动态测试技术 3 个方面，还包括各种工程减振、隔振措施。

土的动力特性　动载荷作用下土的变形和强度特性。①土的动变形特性，指动载荷作用下土的应力-应变特性。在低应变幅（$\leqslant 10^{-4}$）下它接近于黏弹性，常用动模量和阻尼比作为特性参数。②土的动强度，通常指产生某一特定破坏应变的冲击应力或一定循环次数的动应力幅。土的动强度有时间效应（如加载速率、持续时间等）。在动载荷作用下土中孔隙水压力的发展和消散特性是决定其动强度的一个关键因素。土体液化是土的动强度研究中的一个重要问题。③土的残余变形，土在一定循环次数的动荷载作用下产生的附加永久变形。

土体动力反应分析　对动载荷作用下结构物土基与土工建筑物等土体的动力响应、应力和变形进行分析，包括土体与相邻建筑物相互作用的分析。诸如：机器基础振动分析，地震、波浪和爆炸等动载荷作用下的土体反应分析、土压力和土基承载力分析等。分析方法要根据动载荷特性和土体与建筑物特性来选用。低应变幅的问题可以用弹性波传播理论分析；一些简单的振动问题可用集总质量体系理论分析；对于重要和复杂的问题，有限元法等数值分析方法是一种重要的分析手段。土体动力反应分析结果的可靠性取决于所选用方法、模式和有关的土的参数的合理性。

土的动态测试　在动载荷作用下对土的应力、应变和孔隙水压力以及土体的位移、速度、加速度和土压力等进行测试，内容包括测试理论、设备和技术。用于测试土的动力特性的方法有现场波速测试（压缩波、剪切波和表面波），室内的共振柱、循环三轴、循环单剪、循环扭剪和波速测试等，适用于不同的应力条件和应变幅范围。振动模型试验，特别是离心机上的振动试验，对于探讨土体动力反应和动态破坏机理有重要作用（见土工模型试验）。原型建筑物的人工激振试验，特别是实际动力作用下的原型观测，对于验证和发展土动力学的有关理论和方法更是十分必要的手段（见土工原型观测）。

tufang kaiwa

土方开挖　(earth excavation)　为工程建设需要将土（包括黏性土、砂土、砾、卵石等）开采并搬运至另一处的施工过程，根据施工条件分为陆上施工、水下施工和特殊施工 3 种。

陆上施工　水面以上的各类土方开挖。水电工程土方开挖量大，一般都采用机械作业。机械作业在土层较厚、土壤天然含水量较低时，常用正、反铲挖掘机，斗轮回转挖掘机等立面开挖，自卸汽车、带式输送机运输。土层较薄、土壤天然含水量较高、施工场面宽大时，常用铲运机、推土机配装载机平面开挖，自卸汽车运输。坝料开采一般在设计选定的料场进行。料场开采前应先清除表面无用腐殖土及树根、乱石等废弃物，选择合适的开采方案并根据开采运输条件和天气等因素，经常观测料场含水量的变化，并采取相应措施作适当调整，以满足筑坝要求。在高边坡开挖时，要根据不同土质保持边坡稳定或及时支护以策安全。

水下施工　开挖的土方位于水下（包括砂砾料开采和特殊部位淤泥清除等）。水下砂砾料开采包括天然骨料开采和坝料开采两种；特殊部位淤泥清除，如围堰过水后的基坑清淤、围堰堰体水下部分拆除等。常用的水下土方开挖机械有索铲，正、反铲，抓斗，挖泥船和采砂船等。

特殊施工　在工程特殊部位采用特殊手段的施工方法。主要有：①用风水枪配泥浆泵清除淤泥；②用高压水枪将土造成泥浆利用地形高差自流输泥至需用部位的水力冲填；③隧洞的盾构法、顶管法等（见隧洞开挖）；④在流沙或淤泥地层进行水下开挖时采用沉井法等。

tugong hecheng cailiao

土工合成材料　(geosynthetics)　能对土体等起隔离、防渗、渗滤、排水、加筋和保护等作用的各种高分子工程材料。可分为 3 大类：①透水有纺、无纺及编织型土工织物；②不透水的土工膜；③专门产品，包括土工格栅、土工网、土工席垫等。其原料大多是聚丙烯、聚乙烯、聚酯等。土工合成材料强度高，质量小，有柔性，耐磨，抗腐蚀，吸湿性小，可在工厂预制，施工简便，在土木工程领域内得到广泛应用。

性态测试　在工程应用中需视具体条件选用合适材料及型号，并进行合理设计，为此首先要对土工合成材料的性态进行必要的测试。主要内容有：①物理性（密度、厚度、单位面积质量、孔隙率等）；②力学性（抗拉、抓拉、撕裂、顶破、蠕变等强度）；③水力特性（垂直与水平渗透性、孔径、抗渗比降等）；④合成材料与土相互作用的功能，如摩擦、拉拔及淤堵等；⑤高分子材料在环境因子作用下的老化等。

功能 土工合成材料对土体等主要有隔离、防渗、渗滤、排水、加筋和保护等功能。不同土工合成材料可发挥一种或几种功能，亦可制造组合型土工合成材料，以满足特殊要求。

隔离 将两层不同的材料相互分开，阻止混杂，却允许排水。如将无纺织物铺在铁路道渣与地基土之间，能防止道渣下陷和积水时细粒土向上抽吸，避免路基翻浆冒泥。

防渗 土工膜可用于隔水，铺在水池及渠道底部可以防渗。

渗滤 防止细粒土被水流带走，可用它代替砂砾料滤层。

排水 厚无纺织物本身平面内有导水性，铺在土内作为排水层。

加筋 埋在土体内的合成物靠它和周围土之间的摩阻力及（或）咬合力，可传递作用于土的剪应力，使应力和变形均化，提高土的承载力，如可用于软土地基、土坡及挡土墙后填土的加筋。土工格栅对此尤为合适。

保护 铺设在载荷集中和水流冲蚀的土面上，可起缓冲及分散作用。在沙岸、海岸边坡上铺设，上覆块石盖重，能防止岸坡冲刷。

发展概况 土工合成材料是20世纪50年代末期开始在土木工程中使用的，60年代以来得到迅速推广，广泛应用于公路、铁道、水利水电、港工、石油、冶金等部门的地基、填土、挡土墙、隧道、尾矿坝、运动场及军事工程中。1983年成立了国际土工织物协会（International Geotextile Society，IGS），在国际土力学与岩土工程学会（International Society for Soil Mechanics and Getechnical Engineering，ISSMGE）下也设立了土工织物技术委员会。中国从20世纪70年代末开始研究试用，1984年成立了土工织物科技情报网，1995年成立了中国土工合成材料协会，推动了土工合成材料的发展，其应用领域日益扩展。例如，堤防、围堰、中低土石坝等水利工程大规模采用土工合成材料，泰安抽水蓄能电站上库采用土工合成材料防渗。

土工合成材料原料大多采用高分子聚合物，主要有聚丙烯（PP）、聚酯（PET）、聚乙烯（PE）、聚氯乙烯（PVC）、聚酰胺（PA），其中使用最多的是聚丙烯原料，占土工合成材料总用量的50%以上。聚合物高分子的应用形式与生产土工合成材料的工艺直接相关，其中以纤维形态占绝对比重，工艺包括机织、针织等织造方式或者采用针刺、纺粘等非织造方式。从发展趋势看，复合型土工织物是土工合成材料发展的重点，它兼有各类土工合成材料的优点，具有高性能、多功能的特点，应用范围也大大拓宽。

tugong moxing shiyan

土工模型试验

（geotechnical model test） 采用与土工建筑物和基础原型相似的模型，通过相关测试揭示或预测原型主要物理现象和性状的试验。土工模型试验的模型必须满足相似法则（几何相似、材料相似、力学相似等），才能再现原型实际发生的现象。相似法则可通过量纲分析或微分方程、物理法则导出。为尽量满足相似法则要求，土工模型一般用原型土料制备。土工模型试验分为普通模型试验和离心模型试验两种。

普通模型试验 将几何尺寸为原型的$1/n$的模型，在地球重力场（1g）下进行试验。如挡土墙模型试验、浅基础承载力试验、桩和桩群在垂直和水平载荷作用下的模型试验、加筋土模型试验、渗流模拟试验等。这类模型试验由于简单易行，获得了广泛应用，为试验和发展理论计算方法提供了依据。但在地球重力场（1g）的情况下，如将原型按几何相似缩小n倍，用原型材料制作成的模型，其各点的自重应力远低于原型中对应点的自重应力，而对土体而言，其应力、应变关系和强度均与其应力水平和应力状态密切相关。因此，在地球重力场（1g）条件下的模型相似性差，无法正确反映原型所产生的物理现象。

土工离心模型试验 将几何尺寸为原型的$1/n$的模型置于离心加速度为重力加速度n倍的离心力场中进行试验。重力是土工建筑物最主要的受力变形与破坏的因素。根据Rocha和Roscoe所提出的模型相似性条件，模型材料以及模型内的应力状态必须要与原型相同。这是土工模型试验的特点，也是1g重力场下普通模型试验的困难之处。离心模型试验可以将几何比尺缩小后的模型置于ng的重力场中，使模型材料加重n倍，由此可以将模型中每点的自重应力提升至与原型中对应点等量的程度，使模型满足重力相似条件，从而使模型表现出与原型一致的力学特征。由于高速旋转的离心机可以形成一种可控的离心力场，因此，大型土工离心机是提供人造重力场最方便且最为稳定可靠的试验装置，见图1和图2。

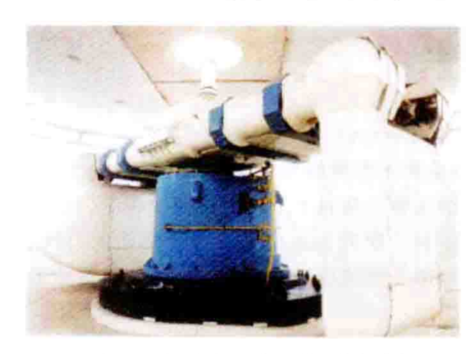


图1 大型土工离心模型试验机

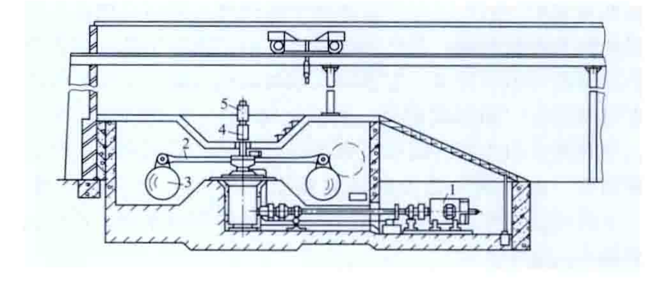


图2 土工离心试验机示意图

1—直流电动机；2—转臂；3—吊篮；4—液压滑环；5—电滑环

沿革 利用离心机进行土工模型试验的思想，最早由法国人E. 菲利普斯（E. Phillips）于1869年提出。1932年莫斯科水力设计院土力学试验室首次利用离心机研究了土工建筑物的稳定问题。从20世纪40年代到70年代，苏联的不同研究机构建造了20余台离心机，对于离心模型试验的相似理论、试验设备的设计技术以及试验方法等作了大量工作。60年代后期，英国、美国、日本等国才开始建造土工离心模型试验机，在离心机的设计制造和模型监测方面采用

了先进的电子技术。80年代后，离心机的容量有了较大规模的提高。

中国在离心模型试验方面的研究始于20世纪50年代，70年代建成了第一台容量为150g・t的土工离心试验机。90年代，一批大、中、小型离心机相继建造完成，土工离心机的最大容量达到450g・t，还开发了数据采集、数据图像处理、机械手、离心机振动台等新技术。

离心模型试验的范围几乎涉及岩土工程研究的各个方面，包括土力学基础理论（土体固结特性研究、土体强度研究、液化机理等）、土石坝工程、土质边坡与岩质边坡的稳定、堤坝渗流、土工建筑物的变形与稳定研究、土体水力劈裂、挡土墙土压力、地下结构与洞室开挖、基础工程与桩基承载力、基坑锚固、土体振动液化、土石坝动力反应及抗震措施等。离心模型试验除土木工程、水利水电工程、港口和海洋工程等方面的研究外，其研究领域还进一步延伸至国防工程、航空航天工程等。

tugong quyang

土工取样 (soil sampling)　从土体中采取代表性土样供测定其物理力学性质的技术。能保持其原位结构和天然含水量的土样称原状土样，否则称扰动土样。两种土样都可通过实验室测试，测定物理力学性质指标和参数，提供工程设计和施工应用。所有原状或扰动土样取出后，都要立即包装密封好，准确、可靠地贴上标签，并记录取样地点、地面标高、取样深度、地下水位及其他现场情况，绘制土层剖面图。取样范围、布孔、深度及土样数量等视土体的不均匀性、工程类别和等级而定。

原状土样　可用于测定原状土的渗透、固结、抗剪强度、应力-应变关系等力学特性，还可根据需要测定抗拉强度、动力特性等。浅层原状土样用人工开挖试坑或竖井采取，深层原状土样需用取样器从钻孔中采取。用取样器取原状土样时，要先钻孔至略高于取样位置，清除孔底残土，然后根据土质情况用静压或击入法使取样器贯入土层内取样。取得土样后应立即密封，以防含水量变化。钻孔、取样以及在运输、储存及削制过程中均应尽量减少土样扰动，但因取样而引起的应力解除不可避免。

(1) 取样器。有敞口贯入式、双筒式、活塞式等多种形式，需根据土的性质、软硬程度和其他条件选用。取样器规格对所采取土样的质量有很大影响，故对其直径、内间距比、外间距比、面积比、端部刃口的形式和角度等技术参数都有一定要求。

(2) 原状黏性土样采取。一般土层用敞口贯入式取样器。对于软黏土，特别是地下水位以下的软黏土，宜用薄壁活塞取土器。对坚硬黏土，可用双筒式取样器。钻孔可以用回转钻机钻进。

(3) 原状砂样采取。取原状砂样较困难，方法主要有：①泥浆钻孔中用固定活塞取样器采取。②冻结法。在钻孔套管中投入液氮或干冰等制冷剂，使管周土体冻结成坚硬土柱，然后用取样器采取，用冷冻车送到试验室。该方法效果较好，但费用昂贵。③用触变性钻进液代替泥浆钻孔，使砂土骨架固定，而采取原状砂样。④气压法。曾用过，但未获推广。

扰动土样　用于鉴别土的属类、划分土层及评价土体性状。浅层扰动土样可用人工开挖或挖土机采集。深层土样用土钻或标准贯入器采取。取样过程中观察到土类有改变时，就采集供鉴别用的土样。从每种主要土类中，采取足够数量的土样供实验室试验之用。试验项目有密度、含水量、比重、颗粒分析、液塑限、缩限、相对密度等物理性试验和矿物化学分析。在堤、坝、道路、机场跑道等填方工程中，还用扰动土样做击实试验，并制备一定尺寸、具有与填土相同的密度和含水状态的试样，测定渗透、固结和抗剪强度等力学特性。

tugong yuanxing guance

土工原型观测 (in-situ measurement in soil engineering)　对工程的土体或土与建筑物结合部位进行目测和仪器检测，以掌握其运行实态的手段。由于现有的土工计算还不能精确地预估土体的性状，因此需要利用原型观测控制施工、监测安全和反演参数，并提高设计、施工及管理的技术水平。对于土石坝、堤防、水电站、高层和重型建筑物，以及灾害性滑坡体等都应进行土工原型观测，监测工程安全。土工原型观测分外部检测和内部观测两类。外部检测包括目测土体或建筑物的外表现象和在其表面埋设标点，用测量方法观测垂直和水平位移。土体内部观测须埋设仪器设备进行静态及动态观测。一般以静态观测为主，有变形、孔隙压力和土压力观测。对水工建筑物尤其应注意渗流观测。以现代高技术为基础开发的多种实时监测系统，可以对观测设备进行自动化集中遥测、数据采集、传送、处理和分析，提高了监测水平。

变形观测　分垂直位移、水平位移和土体应变观测。地基的垂直位移可用电磁式沉降仪观测，土石坝多用横梁式或水管式沉降计。内部水平位移通常用测斜仪观测，对土石坝也可用引张线式水平位移计。采用三向位移计可同时观测土体内部3个方向的位移。土体内部位移的观测数值是相对值，需通过对地表基准点的测量和换算，定出其绝对值。

孔隙压力观测　土体内孔隙水压力的变化受土体固结和渗流的影响，选用渗压计需考虑观测时的时间滞后现象。为此对渗透性大的土体可用直径50mm的测压管，对中等渗透性的土体用竖管式渗压计，对渗透性小的土体可选用电测式、水管式或气压式孔压传感器。

土压力观测　一般采用土压计。常用土压计有液（气）压平衡式、钢弦式、差动电阻式、电阻应变片式等。按埋设部位分，又有界面式和埋入式两种。土压检测时，由于土压计承压面有变形，使局部土体应力场发生变化而影响测验值，土越硬，感应膜越软，误差越大，现有的校正方法还不能完全消除这种误差。

渗流观测　包括渗透压力、渗透流量、渗水的透明度及水质变化、绕坝渗流、导渗降压效能等观测项目。

参考书目

Dunnicliff J. Geotechnical Instrumentation for Monitoring Field Performance. New York: Wiley, 1988.

tulixue

土力学 (soil mechanics)　研究土和土体的工程性质及其应用的学科。土是岩石风化后就地堆积或经过搬运后

重新沉积的地壳表层的松散堆积物。它是由固体颗粒骨架和充填在骨架孔隙中的水和气组成的三相体系，具有碎散性和孔隙性的特点。具有一定规模、被作为整体研究的土层称为土体。土力学是土木工程学和工程地质学相结合的产物，它借助于物理、化学、力学、工程学和地质学的基本原理，通过土工试验、理论分析、工程实录等途径，研究土的渗透、变形和强度特性及其变化规律，土体渗流、变形和稳定计算理论和方法，土与结构物的相互作用，以及土体加固处理技术，解决地基、土坡、土工建筑物、地下洞室、挡土结构等实际土工问题。

土的成因和物理化学性质　在土的基本性质方面，需研究其成因、物质成分、结构性以及物理性质和工程分类。

（1）成因。根据土的形成条件，可分为残积土、沉积土和人工填土等。残积土是岩石风化后原地堆积而成，沉积土（包括坡积、洪积、冲积、冰积、风积土等）是在一定地质营力作用下经过搬运后在特定环境下重新堆积而成，各具有不同的成分、结构性和物理力学特性。

（2）物质成分。分为固相、液相及气相 3 种。①固相，可分成有机质和无机质两大类。有机质又分为动植物残骸未完全分解的泥炭和完全分解的腐殖质。无机质可分为原生矿物和次生矿物。原生矿物是物理风化的产物，仍保持母岩的矿物成分；而次生矿物还有化学风化作用生成的与母岩成分不同的新矿物，包括黏土矿物和可溶盐类。黏土矿物以蒙脱石、伊利石、高岭石 3 组为典型，是黏土粒组的主要成分。可溶盐类按溶解度分为难溶盐、中溶盐和易溶盐 3 类。②液相，为水或各种电解质的水溶液，与固相表面有相互作用，对土的工程性质有重大影响。在粗粒组中主要是由水气界面上表面张力而引起的毛管力作用；对黏粒还有物理化学作用。受黏粒表面电场影响而与土粒相互吸引的水称结合水，而不受土粒表面电场约束的水称自由水，其中受表面张力控制的称毛管水，受重力控制的称重力水。其存在形态及在孔隙中的流动规律是各不相同的。冰是固态水，在土中有特殊的作用规律。③气相，主要是空气，也有一些水蒸气和有机物分解产物。从力学性质而言，可分为开敞型和封闭型两种，前者与外界大气连通，而后者以封闭气泡的形式存在，其压力一般高于大气压。

（3）结构性。包括宏观结构和微观结构两类。宏观结构包括不同性质土层的空间分布、非均质、各向异性等，从勘测试验中探明以后在分析计算中予以考虑。微观结构包括颗粒空间排列及粒间力的大小和性质两部分，无黏性土主要取决于颗粒排列，而黏性土则两者都有影响。黏土颗粒通常以大小不同的团粒形式存在，可以用团粒理论描述黏土结构，解析其各异的工程特性。

（4）物理性质及工程分类。见土的工程分类。

土工试验　利用各种仪器设备测定土的矿物化学成分及物理力学性质指标，供土的工程分类、设计计算及确定施工方案之用。

土工试验有试验室试验、原位测试（见土的原位测试）及模型试验（见土工模型试验）3 大类。试验室试验有矿物化学、物理性及力学性试验。

（1）矿物化学试验。包括矿物成分分析，交换性阳离子总量及其成分分析，化学全分析，土中水全分析，易溶盐、中溶盐、难溶盐、有机质含量，比表面积，pH 值测试等。

（2）物理性质试验。试验指标有含水量、密度（或重度）、比重、颗粒大小分布、液塑限、缩性限度、最大最小干密度、湿化、膨胀等项。计算指标有各种密度（包括干密度、饱和密度、浮密度等）、含水率、比重、孔隙率、孔隙比、饱和度、塑性指数、液性指数、相对密度、活动度等。除为获取上述各项指标的试验外还有击实试验，用以求出填土的最优含水量和最大干重度。

（3）力学性质试验。试验项目有应力应变、强度、固结压缩、流变、渗透和渗透稳定、动力特性等。

对于特殊土类，如红土、湿陷性黄土、膨胀土、分散性土、冻土、盐渍土、泥炭等，各有其特殊的工程性质，常需进行专门性土工试验，以满足实际工程需要。

土的力学性质　表述在土体自重或外力作用下土骨架的应力-应变强度时间关系及孔隙水、气变化特性的基本规律及其数学表达式。土的力学性质可归纳为渗透、强度及变形三大定律（见渗流、土的力学性质），彼此有相对的独立性，而又有相互联系。动力作用下的强度和变形规律见土动力学。

土工计算　将土力学基本理论用于解决实际土工问题所进行的分析计算工作。需要解决的土工实际问题主要为渗流、变形和稳定 3 大类（见渗流、土的固结与沉降、土体应力-应变分析、土体稳定性）。

简史　土力学是一门古老的学科。人们对土的认识可追溯到史前时期。最古老的土坝约在公元前 4000 年建于约旦。在埃及、中国、印度等古代文明发源地，大约公元前 3000 年就开始修筑防洪堤。中国宋代就有了较完善的建筑法规。但是直到 1700 年以前，土力学知识还是纯经验性的。

在 1717～1925 年间，针对土的性质及某些土工问题出现了个别的理论，但没有发展为完整的学科，可以认为是古典土力学的奠基时期。从 1776 年 C. A. 库仑（C. A. Coulomb）提出土的抗剪强度公式和土压力理论，到 1862 年 W. J. M. 朗肯（W. J. M. Rankine）土压力理论发表，原则上解决了土体极限平衡理论及土压力问题。1856 年 H. P. G. 达西（H. P. G. Darcy）用砂做了系统的渗透试验，提出了达西渗透定律。1896～1902 年在印度进行的管涌和反滤试验中，提出了水力坡降理论，以及由上游护坦、截水墙、下游反滤层组成的防渗系统。1910～1927 年间，黏土研究中出现了阿太堡（Atterberg）稠度试验、直接剪切试验、瑞典圆弧滑动稳定分析法，进行了固结和抗剪强度的基本研究。特别是 K. 太沙基（K. Terzaghi）发现了有效应力原理，将土的主要力学性质联系起来。以 K. 太沙基 1925 年发表《建立在土物理学基础上的土力学》一书为标志，土力学开始形成独立学科，并进入迅速发展的现代时期。

中国从 1939 年开始在原中央大学开设土力学及土工试验课程，1940 年在原中央水工实验所建立土工试验室。1949 年以来，随着大规模经济建设，土力学也得到新的发展。20 世纪 80 年代以后，由于电子计算机及相关学科的发展，土力学的数值分析方法和试验技术更加完善，主要表现在：①土工试验仪器、方法和量测技术更加完善和现代化，能更好模拟土体的实际工作状态，获得较为符合土体实际状况的数学模型及参数。②以有限元法为代表的数值分析技术

引入土力学计算，为解决复杂的土工问题提供有效手段。③原型监测技术大为提高，并引起普遍重视，成为改进安全评价、检验监测和设计施工的重要途径。④土工合成材料的广泛采用，对土工技术有重要影响，加筋土等复合材料成为土力学研究的重要方向之一。⑤发展了土质学、土动力学、冻土力学、概率土力学、环境土力学、海洋土力学、冰雪力学等新分支。

tushiba

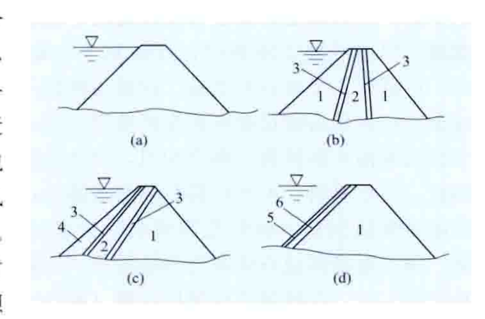
土石坝 (earth and rockfill dam; embankment dam)

以当地土石材料为主建造的坝，一般由支持坝体稳定的土石体、防渗体，以及反滤、排水、过渡层、护坡等部分组成。土石坝能适应地形、地质条件较差，尤其是河床覆盖层较深的坝址；可以就地取材，充分利用工程开挖料；节约水泥钢材，减少外来材料的运输；具有施工简便、造价低、工期短、便于分期建设等优点，应用十分广泛。土石坝一般只能挡水，不能过水，仅对泄洪流量小的低坝或临时工程可做成过水土石坝形式，所以在峡谷地区大江大河上修建土石坝时，要妥善解决好施工导流和泄洪消能问题。

类型 通常按建筑材料、防渗材料、施工方法对土石坝进行分类。

(1) 按建筑材料分，可分为土坝、堆石坝和土石混合坝：①土坝。黏性土、砂砾石土、砾质土等土质材料占坝体积的50%以上。②堆石坝。爆破开挖料、砂砾石和石渣占坝体积的50%以上。③土石混合坝。从材料上难以明确划分的土石坝。

(2) 按防渗材料分，有均质坝、土质防渗材料分区坝和非土质防渗材料分区坝3种基本类型（见图）。①均质坝。坝体断面不分防渗体和坝壳，绝大部分由一种渗透性相近的黏性土（包括砾质土、风化料）组成。②土质防渗材料分区坝。坝体断面由维持稳定的粗粒料坝壳和起防渗作用的土质防渗体及若干透水性不同的土石料分区构成，按防渗体位置主要分为斜墙坝、心墙坝、斜心墙坝。③非土质防渗材料分区坝。坝主体由强度高的粗粒料组成，而防渗体则为钢筋混凝土、沥青混凝土或土工膜（含复合土工膜）等建成的上游面板，这种坝统称面板坝。其中以混凝土面板堆石坝应用最广，有时也用沥青混凝土、混凝土做防渗心墙，大型抽水蓄能电站上水库、大型水电站施工围堰及中小型工程有时也使用土工膜防渗。



土石坝基本类型图

(a) 均质坝；(b)、(c) 土质防渗材料分区坝；(d) 非土质防渗材料分区坝

1—坝主体（或坝壳）；2—心墙或斜墙；3—反滤过渡层；4—保护层；5—面板；6—垫层及过渡层

(3) 按施工方法分，有碾压式土石坝、水中填土坝、水力冲填坝、抛填坝和定向爆破坝等类型。其中碾压式土石坝是分层铺填土石料、分层压实填筑的，坝体质量良好，最为常用，世界上现有高土石坝都是碾压式的。

坝体设计 应满足的要求有：①材料分区从上游至下游，或由防渗体向两侧由细变粗，防渗体下游上部干燥区料物可适当降低要求。②防渗体与坝壳体之间、各种不同料物之间都需满足反滤要求，否则需设置反滤过渡层。③防渗体下游、坝基表面及下游坝趾处设完整的排水系统，将渗过坝基及防渗体的水排至下游，以降低坝体浸润线，并防止渗透破坏。④上游面设置护坡，防止风浪淘刷及冰层和漂浮物的损害。下游坡可视具体情况设或不设护坡。均质坝下游坡面宜设排水设施。⑤坝顶宽度视其用途和构造要求而定，最好设置柔性盖面。上游设防浪墙，与坝体防渗体紧密连接，并按挡水设计。坝顶要有足够超高，任何情况下库水不得漫顶。⑥坝的防渗体与坝基及其他建筑物必须紧密连接，不得有危害性渗漏现象，并与坝基防渗设施连接成完整的防渗系统。

坝基处理 土石坝传递给坝基的应力小，几乎适应各种地基条件。但坝基条件的好坏也关系到坝基处理问题，并对坝体设计、大坝投资和工期产生较大影响。土石坝坝基应具备无论在什么荷载状况下，对坝体都必须具有足够的安全承载力和抗剪强度，对渗流具有足够的抗御力。常用的坝基处理措施有表面清理、软基处理和岩基处理3种。

(1) 表面清理。要求清除坝基表面的耕土层、植物根须、风化层、淤泥、松砂等软弱松散土层等，并对基岩表面断层破碎带、较大节理、裂隙逐条清理回填，并喷砂浆或混凝土、浇筑混凝土盖板保护清理好的坝基面。

(2) 软基处理。见软基处理。

(3) 岩基处理。土石坝岩基在强度和变形方面能满足要求，主要是渗流控制，特别是与土质防渗体接触面上的渗流冲刷危害很大。常用的措施是在接触面上喷砂浆或铺混凝土垫层，并在防渗体底部基岩表层进行铺盖式灌浆和帷幕灌浆（见防渗帷幕）。

分析计算 主要有稳定分析、变形分析和渗流及渗透稳定分析3个方面。

(1) 稳定分析。基本方法为单一安全系数法。坝坡及覆盖层地基抗滑稳定计算采用刚体极限平衡法。对于均质坝、厚斜墙或厚心墙坝，可采用计及条块间作用力的简化毕肖普(Simplified Bishop)法。对于有软弱夹层、薄斜墙坝、薄心墙坝及任何坝型的坝坡稳定分析，可采用满足力矩平衡的摩根斯坦-普赖斯（Morgenstern-Price）等方法。计及和不计及条块间作用力的计算结果应满足规范规定的相应坝坡抗滑稳定最小安全系数的要求。控制土石坝稳定的有施工期（包括竣工时）、稳定渗流期、水库水位降落期，需分别核算，并同时满足要求。地震区还要作动力稳定性分析。

(2) 变形分析。常用的方法有：①以弹性理论为基础的分层综合法，计算坝体及地基的垂直位移，即沉降量。②以固结理论为基础，计算沉降及孔隙压力消散的时间过程。③有限元法，计算各个时期坝体及地基各点的3个方向的位移、总应力及孔隙压力，用以判断可能出现的拉应力区和超应力区、可能出现裂缝的部位及水力劈裂的可能性。应力、变形计算宜采用非线性弹性（也可采用弹塑性）有限元法，计算参数由试验并结合工程类比确定，按照施工填筑和蓄水过

程，模拟坝体分期加载的条件。

(3) 渗流及渗透稳定分析。传统的渗流分析方法是以水力学或流体力学理论为基础，对各种简化的典型断面求解析解。对复杂情况，还采用电模拟法进行试验验证。以有限元、边界元等为代表的数值计算方法广泛应用于复杂和大型工程中。根据绘制的流网图及土的渗流稳定特性，可以计算土体发生渗透破坏的可能性，并研究采取相应措施。(见渗流、渗流控制)

简史　土石坝是一种最古老的坝型，可追溯到5000年以前。在中东地区、埃及、希腊、中国等文明发源地，早就修建了土石堤坝，以形成蓄水或防洪工程。中国有记载的最古老的土坝建于公元前约600年的芍陂，即今安丰塘水库。公元516年，中国在淮河中游干流上建成50m高的浮山堰土石坝。

在20世纪40年代以前，土石坝的设计基本上是经验性的。由于施工机具的限制，大型碾压式土石坝还很少，但是水力冲填筑坝方法却大为流行，陆续修建了不少高50m以上的大体积土石坝。堆石坝的发展比土坝要晚得多，直到20世纪30年代以后才有较大发展。当时堆石坝是用厚层抛填方法填筑的，初期用木质面板防渗，以后又采用钢板、混凝土面板及沥青混凝土面板。在20世纪四五十年代，由于抛填的混凝土面板堆石坝存在过量变形导致裂缝漏水等问题，使这类高坝几乎停建。土力学理论的发展提高了土石坝设计水平，特别是反滤层原理、压实理论等的发现，使土石坝的安全性更有保证。同时，施工机具的发展，已有可能在短期内完成大量土石方工程。这就导致了土质心墙坝的迅速发展，建成了一批高150m级的心墙坝。60年代至20世纪末，土石坝建设进入现代阶段。由于采用振动碾薄层碾压堆石取代了厚层抛填堆石，坝体密实而且变形很小，不致引起混凝土面板断裂和接缝张开而大量漏水，使混凝土面板堆石坝重新得到发展，最大坝高达190m级，土质心墙坝则高达到300m。进入21世纪，土石坝由于土力学的进步而得到快速发展，积累了高地震区筑坝、深覆盖层上建坝和超高坝建设的经验。面板堆石坝最大坝高达230m级，土心墙堆石坝正在向300m以上坝高发展。随着防渗墙和灌浆帷幕等垂直防渗技术的发展，在深覆盖层上修建高土石坝已成为一种发展方向。

参考书目

顾淦臣，束一鸣，沈长松．土石坝工程经验与创新．北京：中国电力出版社，2004.

周建平，宗敦峰，杨继学，等．现代堆石坝技术进展——2009．北京：中国水利水电出版社，2009.

tushiba cailiao xianchang shiyan

土石坝材料现场试验

(in-situ material test for earth and rockfill dam)　为核实或修正有关筑坝材料的设计、施工技术指标，选择合适的施工机具和施工工艺，确定各项施工参数和施工质量要求而在现场进行的试验。一般包括料场开采试验、筑坝材料有关特性调整试验、土石料铺筑压实试验、土石坝填筑质量控制试验等。

料场开采试验　料场的材料是否值得开采，要经过技术经济论证，在论证中除料场地形、地质、水文、气象、储量及质量等客观条件外，施工设备和施工工艺的选择主要取决于现场试验。①土料。根据料场大小、料层厚薄、可开采量和土料的天然含水量，在料场进行不同施工设备和施工工艺的开采试验，确定平面开采的分层取土厚度或立面开采工作面高度。②砂砾料。除在料场选择施工设备、开采及筛选工艺外，还包括将水下开采转变成水上开采，以及将动水开采转变成静水开采的施工工艺试验，减少细粒料流失量和天然级配的筛分试验。③石料。在有代表性的料场采用不同爆破方式的爆破试验，包括爆破参数选择及爆破器材性能试验，起爆网络准爆试验，药包或炮孔结构设计参数选择试验，为满足开挖强度要求的梯段高度、台阶宽度、爆堆形状、爆出岩块级配和石块粒径等进行的爆破效果试验，不同爆破方式所产生的爆震波、空气冲击波及个别飞石对附近建筑物和施工场区的环境影响范围测定试验等。

筑坝材料现场有关特性调整试验　筑坝材料由于受料场地形、地质、水文、气象等影响，各项指标很难同时满足设计和施工要求，常需经过现场施工试验加以调整。①土料。用作防渗体的土料，当天然含水量高于施工含水量上限值，或低于施工含水量下限值时，都要在料场通过施工试验调整(见土石坝施工)。若天然含水量低于施工含水量的下限值，一般要进行料场浸水试验。试验方法可采用试坑灌水法或畦块注水法。在料场设一定数量的试坑或畦块，坑内注水、浸泡。浸泡期间随时打检查孔测定含水量的变化，并记录水深、浸泡时间、气温等数据。试坑灌水法适用于浸润土层较厚、施工采用立面开采的料场。畦块注水法适用于分层加水平面开采料场。若天然含水量高于施工含水量上限值，通常采用翻晒法，即在料场用农耕机械将表土层开沟、耕松、捣碎、翻晒。有条件时，也可将高含水量土料通过热风进行强制干燥。当料场土的黏粒含量较高时，或在年降雨量较大的潮湿多雨地区施工困难时，或高黏土心墙坝土料要求掺砾时，可进行人工掺合料试验。在料场将黏土料与干燥粗粒料或加工好的砾石按试验级配交替分层平铺，然后用挖掘机械立面或斜面开采拌和，掺合均匀，使之达到设计和施工要求指标。②砂砾料。天然砂砾料要经过筛分，若超径石过多或级配中断缺少某一粒径范围料时，常通过试验找出调整措施，加工超径料或石渣补充所缺粒径。③石料。开采的块石块径较大时，在料场进行解炮试验(即将大块石再打眼放炮使其改小)；利用建筑物开挖的石渣时，作清除石粉、泥团、杂物和调整级配试验等。

土石料铺筑压实试验　土石料填筑前，一般都要针对不同压实设备和施工工艺进行现场碾压试验，选择符合施工实际的施工参数和压实机具。①土石料参数试验：选有代表性的土石料进行土的击实、剪力、揉搓、振动、压实试验，砂砾料的渗透试验，石料的抗压强度试验等，以核实设计采用的坝料参数是否合理。②施工工艺试验：对各种坝料所选用压实机具的碾重、接触压力、铺料方法、铺料厚度、压实方法、碾压或夯击遍数、含水量控制等施工参数进行对比试验，采用逐渐收敛法反复试验，使所有参与碾压试验的参数都达到最优，然后进行复核，若能满足设计和施工要求，即为所定的压实参数。由于在试验时不可能与现场施工条件完全一致，所得试验的压实标准合格率应稍高于设计要求。

土石料填筑质量控制试验　在土石料填筑施工中，按规

定随机取样控制填筑体压实质量的试验，是保证压实体填筑质量的必要手段。①土料：通常在施工中控制土料的含水量和土料的干容重指标。在料场快速判别土料是否满足设计要求，一般根据经验用手试法估测含水量。土料压实干容重是否合格，除用手试法估测外，主要随机取样烘干测定，据此及时校正压实的干容重。一般土的含水量测定方法有酒精燃烧法、红外线烘干法、电炉烤干法、微波含水量测定仪等。②土石填筑料容重测定：黏性土及砂用体积为 200～500cm³ 的环刀取样测定；砾质土、砂砾料、反滤料用灌水法或灌砂法测定；堆石体因其空隙大，一般用灌水法测定。

tushiba shigong

土石坝施工　(earth and rockfill dam construction)

按设计要求，用土石材料筑坝的实施过程。土石坝的施工方法主要有干填碾压、水中抛填和定向爆破筑坝等。

土石坝施工方法以碾压填筑最为普遍，其中以碾压式土石坝和混凝土面板堆石坝最具现代化高效机械施工的代表性，其主要施工程序包括导流、料场规划、坝料开采与加工、坝料运输、坝体填筑、坝基防渗、土石坝现场试验、施工质量控制等工作，见图。



糯扎渡水电站土石坝施工

导流　碾压式土石坝坝体大都在干地填筑，所以施工时要将河水通过设定的导流建筑物绕过坝体泄向下游（见施工导流）。为节省坝体土石方量，心墙式土石坝施工时用于挡水的土石围堰也常与坝体结合作为坝体的一部分，堰体施工时的各项技术要求与坝体同。

坝体施工期的拦洪度汛，是土石坝施工的关键。土石坝体由非凝集性材料组成，一般在没有保护设施时，不允许坝体过水，在土石坝施工中常用抢筑填高的坝体来拦洪度汛。当坝体全断面度汛有困难时，可用施工临时断面拦挡洪水，以降低坝体填筑强度，但临时断面要能满足安全超高、稳定、防渗及顶部预留适当宽度，以适应在遭遇超标准洪水时抢筑子堰的要求。

料场规划　土石坝施工前要详细查明各种筑坝材料的质量和可开采储量，规划其开采范围、使用时段和填筑部位，根据坝体总方量和填筑强度要求，提出分期分批用料计划，确定料场数量和开采工作面。做到高料高用、低料低用，上、下游料避免交叉运输，并保留一定备用料和有计划地划定一部分近料场供截流围堰合龙和抢筑拦洪高程时使用。

充分利用建筑物施工中的合格渣料作坝壳填筑料，是土石坝施工中降低工程造价和减少重复开挖的有力措施，一般在料场规划中均很重视土石方平衡及渣场规划工作。

料场规划确定后，要划定料场用地范围，包括弃渣场、倒运场和坝料加工场地，并做出工程竣工后弃、倒渣场的环境保护及水土保持规划。

坝料开采与加工　坝料开采根据料场规划进行，包括土料、砂砾料、石料的开采。

(1) 土料开采（见土石料开采）。当料场土层较薄或土的天然含水量大于施工含水量上限时，一般采用平面开采法；土层较厚，沿深度的土的含水量不匀或表层土的天然含水量小于施工含水量下限时，则采用表层挖坑渗水、立面开采法。施工含水量为最优含水量以上 3%、以下 1% 范围的含水量。对于高黏土心墙坝的心墙土料，为了增加土料强度、控制心墙沉降变形，还需在现场对土料掺加砾石。

(2) 砂砾料开采（见土石料开采）。砂砾料作坝壳料时，要注意控制特大卵石，使不影响填筑层厚度。以砂砾料作为土石坝的反滤料或垫层料时，因质量要求高，一般须筛选加工配制。当坝址附近缺乏天然反滤料时，也可用石料破碎加工获得。

(3) 石料开采（见石方开挖）。常用深孔梯段爆破或洞室爆破方法开采。与通常的开挖爆破不同，坝体石料开采要满足设计级配的要求，大都采用深孔梯段微差挤压爆破技术，实现控制粒径，改善级配，通过现场爆破试验调整相应爆破参数来控制石料的开采块度。对要求规格严而数量不大的石料，也可用浅孔爆破法开采。

坝料运输　将开采或加工好的合格坝料从料场运至坝面的过程，见土石料填筑。常用的有自卸汽车运输、皮带机运输和混合运输 3 种方式。

(1) 自卸汽车运输。土石坝施工中最常用的运输方式，一般采用载重量为 20～45t 的自卸汽车运输。

(2) 皮带机运输。用胶带输送机运送坝料的方式。

(3) 混合运输。自卸汽车运输和皮带机运输组合的运输方式。

坝体填筑　坝体填筑一般按设计坝体断面及设备能力将坝面划分成若干区段流水作业。合格坝料经过卸料、平整、洒水、压实、抽样检验合格后方能完成一个填筑块。在坝体填筑前，将坝基表层植被、杂物等清除，对坝基内不良地质构造进行处理，做好基础防渗设施。坝体填筑分为碾压式土坝填筑、堆石坝填筑、定向爆破坝填筑等。

(1) 碾压式土坝填筑。包括均质土坝、土质心墙坝或土质斜墙坝的填筑。土质心墙坝和土质斜墙坝的填筑程序不同。前者在同一高程工作面，先填筑心墙土料，而后按设计结构填筑两侧反滤料和上、下游过渡料或坝壳料；后者则先填筑下游坝壳料，而后填筑下游过渡料及反滤料，再填筑斜墙的土料和上游反滤料，最后填筑上游过渡料。防渗土体主要用羊足碾、气胎碾或振动凸块等机械碾压实。坝壳料碾压机械主要用振动平碾，在缺乏碾压设备的工地，也有用夯板夯实土料的。在坝面边角及两种坝料的接合部位，大型碾压设备不能压到之处，还要用轻型碾压设备压实。

(2) 堆石坝填筑。包括土质和沥青混凝土心墙、斜墙以及混凝土和沥青混凝土面板堆石坝的填筑。早期堆石坝体用

抛填堆石法施工，用这种方法填筑的堆石体沉陷量大，影响面板和止水结构的防渗功能。自20世纪60年代以来，振动碾压设备的引入，堆石坝体可以像土坝施工一样分层用振动碾压实，对石料的要求也适当放宽，且可最大限度地利用坝址处建筑物开挖渣料或河床卵砾石料，尤其是混凝土面板堆石坝，施工灵活、方便，受气候影响小。混凝土挤压边墙固坡技术的使用，进一步加快了施工速度，促进了堆石坝的发展。

面板堆石坝施工特点主要有：①垫层料抗冲刷和抗渗透能力较强，允许施工初期采取安全防护措施挡水或过水度汛，简化了导流度汛的程序，可缩小导流建筑物的规模。②坝体主要由堆石料构成，可充分利用开挖料填坝。断面简单，各工序之间干扰少，施工场面大，可充分发挥大型机械化设备的施工能力，为高速度填筑创造了条件。③堆石坝体可以根据施工需要在平面和立面上进行分期填筑，分期蓄水。④堆石坝体填筑受气候的影响较小，冬季、雨季一般都可以施工，有利于加快大坝施工进度。

混凝土面板施工在堆石坝充分沉降后进行，一般采用滑模施工，由下而上分期或一次连续浇筑，水平施工缝视施工需要设置或不设，条块间的垂直压缝需设可压缩填料，条块宽度一般为12～18m。面板施工包括钢筋绑扎，混凝土拌和、运输、真空溜槽入仓、振捣、保湿保温养护等几个工序。面板滑模机具主要包括滑动模板、侧模板、牵引机具等。面板滑模根据其支撑和行走方式可分为有轨滑模和无轨滑模两类，无轨滑模的兴起使面板浇筑工艺趋于轻便、灵活。

沥青混凝土防渗体包括沥青混凝土斜墙、沥青混凝土心墙以及沥青混凝土面板，其施工方法主要有碾压法和浇筑法（见*沥青混凝土施工*）。前者是将热拌沥青混凝土混合料摊铺后碾压成型的施工方法；后者所用热拌沥青混合料沥青含量较多，高温流动性较好，靠自重压实。沥青混凝土铺填和压实采用专用喂料铺筑机械和振动压实机械进行，并且施工过程中温度控制十分严格。

（3）定向爆破坝填筑（见*定向爆破*）。借炸药能量将被爆介质沿着预定方向堆积成一定形状的土石坝体。爆破筑坝有两种方法：一种是定向抛掷爆破；另一种是爆破形成人为滑坡筑坝，如中国陕西坝高85m的石砭峪水库大坝，爆破筑坝前，在坝址一岸或两岸根据地形、地质条件和上坝方量要求，预先设置起爆药室。药室数量、大小、位置以及抛掷方向、起爆时间根据装药量和要求爆落石方堆积部位设计，用导洞、竖井或斜井与地面沟通。药室装药后用起爆体（即用木或其他材料制成内填炸药和起爆雷管的先期起爆箱）起爆。爆破后剩留在爆区的岩块用堆石坝填筑方法施工。

坝基防渗　土石坝基础为砂砾石覆盖层时，坝基防渗通常采用截水槽、混凝土防渗墙和灌浆帷幕等垂直防渗措施。

土石坝现场试验　采用仪器和设备，按设计要求对现场筑坝材料工艺参数进行量测验证的过程。土石坝现场试验一般有土料、砂砾石料及堆石料的碾压试验，石料场爆破试验，坝料加工试验以及混凝土防渗墙、基础灌浆压水试验等；按坝型要求，在现场一般设有土工、混凝土、沥青试验室。

坝体填筑前，根据设计要求指标、各个料场的不同料源、施工工艺和设备性能，在现场坝体以外做各种坝料的碾压试验，选定所用设备的各项施工参数和质量控制指标。

堆石爆破试验一般在选定料场进行，根据料场地形、地质条件和堆石料粒径与级配要求进行爆破设计，通过爆破试验确定爆破参数。

对于有特殊要求的垫层料、反滤料及掺合料，通常还进行加工工艺试验，包括筛分、破碎、掺配等，以确定加工工艺及机械设备。（见*土石坝材料现场试验*）

施工质量控制　主要包括压实质量目标控制、填筑过程质量控制。在工程实际中，压实质量控制指标一般以干密度作为主要控制指标。填筑过程质量控制主要分为料场质量控制和填筑质量控制两个方面，料场质量是控制坝料质量的关键，填筑过程中的环节质量是控制压实目标的关键。土石坝施工质量必须全过程控制，每一个环节都必须合格，不能仅在最后检查其合格率。（见*土石坝施工质量控制*）

发展概况　土石坝历史悠久，最早可追溯至5000年前。20世纪60年代以后，碾压式土石坝进入现代阶段。90年代以后，随着大型施工机械的应用，在中国相继建成了坝高160m的*小浪底水利枢纽*大坝、坝高233m的水布垭面板堆石坝、坝高261.5m的糯扎渡心墙堆石坝等，在马来西亚建成了坝高205m的巴贡（Bakun）面板堆石坝。小浪底大坝填筑料运输以载重65t的自卸汽车为主，配备了斗容达10.7m³的液压装载机，月最大填筑强度达130万m³。在各工程中，压实机械广泛采用20～25t的振动碾，有些工程还采用了25t的三角形冲击碾，提高了碾压效率，加快了碾压上升速度。*公伯峡水电站*仅用15个月就填筑完成了最高达132.2m的面板堆石坝，平均碾压上升速度达9m/月，且碾压质量优良。

tushiba shigong zhiliang kongzhi

土石坝施工质量控制

（construction quality control of earth and rockfill dam）　对土石坝施工过程中的各个环节进行直接和间接的测定检验和控制，以保证土石坝达到技术标准要求、满足使用性能的管理工作。主要包括质量目标控制和施工过程质量控制。土石坝施工质量必须全过程控制，每一个环节都必须合格，不能仅在最后检查其合格率。

质量目标控制　压实质量控制指标根据填筑料种类的不同而有差异。防渗体压实控制指标采用干密度、含水率或压实度；过渡料、反滤料及砂砾料的压实控制指标采用干密度或相对密度；堆石料的压实指标采用孔隙率。工程实际中一般以干密度或换算后的干密度值作为主要控制指标，要求：①堆石料、砂砾料现场取样所测定的干密度平均值不小于设计值，标准差不大于0.1g/cm³；②防渗土料的干密度或压实度（压实后的干密度与最大干密度之比，以百分率表示）的合格率不小于90%，同时，不合格干密度或压实度值不小于设计值的98%。

施工过程质量控制　包括料场质量控制、现场填筑质量控制。

料场质量控制　包括：①是否在规定的料场区开采，是否将草皮、覆盖层等清除干净；②坝料性质、级配、含水率（指黏性土、砾质土）是否符合设计要求；③坝料开采、加工方法是否符合规定；④排水系统、防雨措施、负温下施工措施是否完善等。合格坝料才能运输上坝，不合格材料应在

料场处理合格后才能上坝。

现场填筑质量控制　包括：①各填筑部位的边界控制和坝料质量，各填筑料的平起关系；②压实机械的机械参数；③铺料方向、卸料方法、铺料厚度、结合处的压实方法和碾压参数；④过渡料、堆石料有无超径石、大块石集中和夹泥现象，颗粒级配；⑤雨季和负温下的施工措施等。对坝壳料、防渗体，还应在坝面取适当组数的试样进行室内物理力学性质试验，进行复核。施工过程中出现的质量问题、处理结果等应作为施工质量控制的原始记录。

检测方法　包括：①黏性土现场密度检测一般采用环刀法、表面型核子水分密度计法，环刀直径不小于100mm、高度不小于64mm、容积不小于500cm^3。②砾质土现场密度检测一般采用挖坑灌砂（灌水）法，即在压实后的填料层面上，先挖一个一定体积的土坑（或石坑），测量坑内挖出料的干质量，然后用塑料薄膜覆盖坑壁，回填砂（或灌水）至原样，从而测出试坑的体积，最终计算得出试坑内原填土的干密度。③堆石料及反滤料等现场压实检测一般采用挖坑灌水法，但效率较低；附加质量法是在一定面积以下的堆石体通过多级附加一定的质量体，经过振动频谱曲线解析求得堆石参振质量和对应的体积，从而求得堆石体密度的一种方法，自20世纪90年代开始研究并经过多次仪器改良，成功用于多个水电工程的堆石体检测，具有快速、轻便、无损、精度高等优点。④含水率检测一般采用烘干法或烤干法。⑤颗粒级配结合试坑取样进行。

清江水布垭水电站、澜沧江糯扎渡水电站等工程在施工过程中利用全球卫星定位技术、现代数据通信技术、计算机及电子技术等研发了工程质量与安全信息管理系统。特别是在糯扎渡水电站，提出了网络环境下数字大坝系统集成技术，通过该信息系统全面实现了大坝填筑碾压各项参数的全面、实时、在线、自动监控和信息反馈，为工程决策与管理、大坝安全运行与健康诊断等提供了全方位的信息支撑和分析平台。

tushifang kaiwa jixie

土石方开挖机械

(earth and rock excavation machinery)　土石方开挖过程中用于挖、装、铲、推等作业的机械设备。此类设备主要有单斗挖掘机、多斗挖掘机、装载机、铲运机、推土机、挖泥船等。

单斗挖掘机　用一个刚性或挠性连接的铲斗，以间歇重复的循环动作进行挖掘或装载的自行式土石方机械。具有挖掘能力强，构造通用性好，能适应不同作业要求的特点。单斗挖掘机按动力装置划分，有内燃机驱动与电动机驱动2种；按传动方式划分，有机械传动、液压传动和混合传动3种；按行走装置划分，有履带式、轮胎式、步行式、浮动式和铁路式等。水电工程土石方开挖常用的单斗挖掘机有正铲挖掘机、反铲挖掘机、索式挖掘机、抓斗挖掘机等。

正铲挖掘机　铲斗向前推进作业，主要用来挖掘停机坪以上的掌子面（即开挖工作面）。挖掘和推压能力较大、生产率高，可直接装车外运，适于挖掘土、砂砾石或爆破后的岩石，斗容一般为0.5～20m^3。正铲挖掘机按照工作动力，可分为电动式和液压式。世界上最大的正铲电动挖掘机是中国太原重型机械集团有限公司生产的WK-75型挖掘机，标准斗容75m^3；世界上最大的正铲液压挖掘机是美国特雷克斯（TEREX）公司生产的RH400型挖掘机，最大斗容50m^3，主要用在矿山。

反铲挖掘机　铲斗向后掘进作业，主要用来挖掘停机坪以下的掌子面，可就地甩土或装车，适用于沟渠、坑槽及基坑土石方开挖，也可挖掘水下砂石料，见图1，斗容一般为0.2～4.0m^3。世界上最大的反铲挖掘机是德国利勃海尔（LIEBHERR）公司生产的R996型挖掘机，最大斗容36m^3，主要用在矿山。



图1　反铲挖掘机

索式挖掘机　也称索铲或拉铲挖掘机，是铲斗作挠性连接的最常用的一种形式，宜于挖掘停机坪以下且有一定距离的掌子面，适于就地甩土，亦可装车，并能适应水下部位作业。其挖掘能力受铲斗自重的限制，一般只能挖掘土与砂砾石，斗容一般为0.5～14.0m^3。

抓斗挖掘机　铲斗呈抓斗形，可在提升高度和挖掘深度范围内挖掘停机坪以上或以下的掌子面，适用于井下及槽孔开挖和水下清基、清淤等工程，斗容一般为0.5～1.0m^3。

多斗挖掘机　一种由若干个挖斗连续循环进行工作的挖掘机械，主要用于挖取土方或开挖沟渠，剥离采料场、露天矿场上的覆盖及装卸松散材料等作业。此种机械在斗链或轮斗上装有多只挖斗，土体不断被挖取并不断被运出，因此其作业进程是连续进行的。与单斗挖掘机相比，它具有连续作业、生产率高、动力消耗少、自重轻及操纵比较简单的特点。多斗挖掘机按工作装置不同，可分为链斗式和轮斗式两种。

链斗式挖掘机　挖斗连接在挠性构件（斗链）上，依靠斗和斗链的运动挖掘土体，并把土带出掌子面，经转载输送装置将其卸至堆弃地点或外部运输设备上。链斗动臂可以摆动。链斗式多斗挖掘机可进行上采（掌子面位置高于停机坪），也可进行下采（掌子面位置低于停机坪），其中以下采式作业居多。此种机械挖掘深度可达40m，挖掘高度达27m，斗容达2500L。

轮斗式挖掘机　挖斗装在刚性的轮斗上，工作时轮斗不断旋转，机体不断移动或动臂不断回转，挖斗在自下而上的转动过程中挖取土方。当挖斗转到上部位置并开始向下运动时，土从斗中卸出，通过胶带输送机将其运出，可就近卸土或装车外运，适用于大量土方开挖工程及土料开采。挖掘高度为4～20m，下挖深度为0.25～3.0m，轮斗直径为2.4～11.0m，斗容为45～1380L。美国渥洛维尔（Oroville）坝施工中，为开挖砾卵石土料，在采料场上布置了两台轮斗式挖掘机，轮斗直径9.1m，有8个挖斗，每个斗容为1380L，挖掘机的生产能力为4360m^3/h。

装载机　主要用于挖装和搬运土石方等散粒物料，更换

工作装置后，还可以进行推土、起重和装卸等多种作业，是一种机动性很好的高效机械（见图2），在工程施工中的应用越来越广泛。装载机在进行装卸作业时，可将铲斗改装为侧卸式铲斗，形成侧卸式装载机，常用在隧洞等空间狭小的部位。装载机按行走机构的不同，分为轮胎式与履带式2种。



图2 装载机

轮胎式装载机行走速度快、自重轻、机动性好、生产效率高、转移工作场地方便，并可在短距离工作场地内自行搬运。履带式装载机对地面的附着性能好，挖掘力强，缺点是行驶速度慢、灵活性较差、转移工作场地不便，故实际使用较少。装载机铲斗容有1～14.9m³ 多种。

铲运机 一种循环作业式的铲土运输机械，主要用于中距离的大规模土方挖填工程。它能综合完成铲土、装土、运土和卸土4个工序，能控制填土摊铺厚度和进行平土作业，对卸下的土料进行局部碾压。适用于无地下水影响的渠道开挖、堤坝填筑、场地平整、土料开采等土方工程施工。铲运机有拖式与自行式2种。斗容一般为2.5～15m³，大者达57.5m³。

推土机 一种自行式铲土运输机械，主要进行短距离的推运土方、石渣等作业或配合其他机械工作，工作距离不宜超过50～80m。适用于出渣集料、覆盖清理、土料开采、坝面铺料、场地平整及开挖不深的渠道等工程。按推土板操纵方式不同，分为机械操纵和液压操纵2种；按行走机构不同，又可分为履带式与轮胎式2种。由于履带式推土机在松软潮湿和坚硬的岩石等各种恶劣的场地条件下均能适应工作，并能发挥出较大的推力，所以在施工中应用最广泛。常用的推土机功率有39.7～294kW多种。三峡水利枢纽使用的卡特皮勒D10N推土机功率达415kW。

在大型履带式推土机的后部，可根据需要加配液压松土器（又称裂土器），用于劈开或疏松硬土和冻土层，也可松动风化的和裂隙、节理发育的软岩石。

挖泥船 水下土石方开挖的主要机械。在水利水电工程施工中，挖泥船常用于河道疏浚、渠道和基坑开挖、堤坝围堰填筑和拆除、砂石骨料采掘等。挖泥船按舱容、斗容或按生产率划分为2种方式。按舱容或斗容划分，有800、4500m³ 耙吸式挖泥船，4m³ 铲扬式挖泥船；按生产率划分，有40、80、350m³/h绞吸式挖泥船及150、250、500m³/h链斗式挖泥船等。挖泥船根据工作机构原理和输送方式的不同，分为机械式和水力式2类。

机械式挖泥船 以机械周期切割挖掘，以机械提升来完成挖泥任务，即用各种斗或铲挖取并从水下提送疏浚物。链斗式挖泥船、抓斗式挖泥船和铲扬式挖泥船等均属此类。将链斗式挖泥船略加改进，即可成为采掘砂石料的采砂船。

水力式挖泥船 以水力或机械连续切泥，以水力提升来完成挖泥任务。例如，以高压水枪冲泥、绞刀或耙头切泥后，使水和疏浚物混合而成为泥浆，被离心泵吸取，经由管道或其他方式从疏浚现场输送并排放到卸泥地点。由于它的吸入和扬出作用，所以又称吸扬式挖泥船。此类挖泥船包括耙吸式挖泥船、绞吸式挖泥船和无绞刀式挖泥船3种。

tushifang yashi jixie

土石方压实机械 (earth and rock compacting machinery) 用重力、振动或冲击功能对土石方、碾压混凝土、沥青混凝土等进行压实的施工机械，以提高建筑物的强度、不透水性和稳定性。按压实作用原理，可分为静力碾压机械、振动碾压机械和夯实机械3类。

静力碾压机械 主要依靠机械自重的静力作用使被压层产生变形而达到压实的目的，如羊足碾、气胎碾、平碾等。

(1) 羊足碾。主要通过滚轮上的凸块（羊足）将碾重传递于土体，其接触面积小、单位压力大，当羊足插入土体时，土体受到挤压及揉搓的联合作用，因而有很好的压实效果和较高的生产率，广泛用于黏性土料的分层碾压，见图1。可以通过增减碾内配重的办法来调整羊足的单位压力，一般羊足碾的使用总质量为5～20t，羊足接触压力为2～9MPa。



图1 羊足碾

(2) 气胎碾。通过充气的柔性轮胎将碾重传递于土体，碾压时土与轮胎同时变形，开始时，土料很松，轮胎的变形小，土层的压缩变形大，以后随着土料的逐渐压实，轮胎的变形逐渐增加，使得它们的接触面增大，压力分布均匀，压实效果好。气胎碾适于压实黏性土、砂性土与砂砾料等。气胎碾工作时的质量可根据轮胎充气压力（按土料性质选用）、轮胎个数、轮胎尺寸等因素确定。拖式轮胎碾的结构尺寸和质量较大，加载后的总质量一般为8～30t，重型的可达50～200t。

(3) 平碾。单位压力较小，压实深度也浅，但结构简单，可用来碾压对设计干容重要求较低的土料、砂砾料与风化料等。

振动压实机械 利用静力与振动力的联合作用进行压实的机械，如振动平碾、振动凸块碾、冲击碾等。

(1) 振动平碾。依靠碾轮作往复滚动，同时以一定的频率、振幅振动，使被压层受到碾轮的静压力和振动力共同作用的设备。与静力平碾相比，其功效可提高3～5倍。适于压实非黏性土（砂土、砂砾石）、碎石、块石和干硬性混凝土，也可用于沥青混凝土碾压，在堆石坝和碾压混凝土坝的施工中广泛应用。振动平碾有拖式与自行式两种。在水电工程中较多采用碾重为5～25t的振动平碾。一般认为，压实非黏性土和半黏性土的振动频率以1200～2500次/min为宜，压实碾压混凝土的振动频率以2000～3000次/min为宜。

(2) 振动凸块碾。压实原理与振动平碾相同，其足形多采用凸块形，适于压实含水量不大的黏性土和细颗粒砂砾石，以及碎石与土的混合料。

(3) 冲击碾。主要依靠非圆形压实机轮的抬升与下落向

被压实材料释放势能，达到冲击压实的效果，见图2。压实机轮一般为三边形到六边形，轮重1.2～3t。2002年，冲击碾在中国乌江洪家渡水电站坝体填筑中得到应用，取得了较好的效果。



图2　冲击碾

夯实机械　主要依靠冲击能量压实土体，如夯板机、蛙式打夯机、内燃夯实机等。

（1）夯板机。一种用单斗挖掘机改装的夯实机械。它是由主绞车将重2～2.5t的圆形铸铁夯板吊起2～4m高，然后松开离合器，夯板自由下落，产生的动能以冲击形式作用在土体表面，使土体得以压实，适于压实砂砾料、细粒堆石与砾质土。



图3　蛙式打夯机

（2）蛙式打夯机。为手扶操作的轻便夯实机械，采用电力驱动，适于狭窄的沟槽回填或大型碾压机械不能到达的地段进行压实作业，见图3。

（3）内燃夯实机。采用内燃机驱动的轻便夯实机械，适用条件基本同蛙式打夯机。

tushiliao kaicai

土石料开采

(earth and rock excavation)　在选定的料场开挖土料、砂砾料、石料并加工成合格建筑材料的施工过程。水电工程的土石料开采包括筑坝的土料、砂砾料、堆石料、垫层料、过渡料及反滤料，用于制备混凝土的粗、细骨料，防渗墙施工槽孔固壁用黏土料等的挖装、加工、运输工作。由于料区地形、地质、水文、气象等因素影响，各料场技术指标很难全部满足设计和施工要求，在开采过程中不同料物常要进行不同的加工处理。

土料开采　根据土料料层情况及天然含水量，土料开采一般分为平面开采和立面开采两种方式。平面开采多用铲运机、推土机、装载机配合有轨矿车、自卸汽车或带式输送机等薄层平面取土，主要适用于料场面积大、土料含水率高的条件。立面开采是土料开采中常用的开采方法，用正、反铲单斗挖掘机，斗轮挖掘机，装载机等设备垂直取土，多用于土层厚度较大、含水量接近或小于施工控制含水量的情况。料场开采要进行土料含黏量、含水量及粒径的检验及调整，不符合设计规定的土料不得运送上坝。

土的含水量是最敏感的施工技术指标，尤其对防渗土料要求更为严格。对于含水量不符合要求的土料，要采取措施调整其含水量。一般土料要求施工含水量为最优含水量以上3%至以下1%。若天然含水量高于施工含水量上限值，通常采用平面薄层开挖及挖运过程中的自然蒸发、翻晒等方法降低其含水量，多雨地区可预先堆放成形状较为规则的储备土料堆晾干，以调节土料上坝强度要求。当天然含水量低于施工含水量限值时，一般采用料场加水、料堆加水及挖运过程中加水等方法提高土料的含水量。

砂砾料开采　在土石坝工程中，砂砾料除用作坝壳料外，还用于混凝土骨料及坝体反滤料、过渡料等。砂砾料开采有水上和水下两种：①水上砂砾料与土料开采方法基本相同（见土方开挖），当河滩料场地下水位较高时，也有采取截断水源降低水位变水下砂砾料开采为水上开采。②水下开采砂砾料时，所选施工机具要考虑料场水文及砂砾料级配情况。砂砾料开采时，除少量特大超径料可在开采过程中剔除外，超径较多或多级的砂砾料均需筛分加工。当坝址附近缺乏某种级配的砂砾料时，常用人工破碎超径料或石料配制所缺粒径。

石料开采　常用钻孔爆破法开采（见石方开挖）。钻孔爆破分浅孔爆破、深孔梯段爆破和洞室爆破。与通常的石方开挖爆破不同，坝体堆石料开采要满足设计级配的要求，需要进行控制爆破，大都采用深孔梯段微差挤压爆破技术。其优点是能控制粒径，以便有效地改善石料级配，满足设计要求。

浅孔爆破适用于用量不大或要求石料规格较严的采料场。料场出现大块爆破岩石时进行浅孔解炮加工。洞室爆破则多用于开挖量大、开挖强度高的工程以及料场岩体节理、裂隙较发育或风化严重、开采运输条件极差，以及缺乏梯段爆破机械设备的情况。

tushiliao tianzhu

土石料填筑

(earth and rock filling)　将合格的土料、砂砾料、石料运至指定位置，按设计要求填筑的施工过程。水电工程的土石料填筑包括坝体、围堰、防洪堤、路基填筑及各建筑物的基础回填。根据填筑材料和工程要求的不同，填筑工艺和质量要求也不同。

土石料运输　土石料在开采、加工合格后，视料物种类、用量多少和运输条件选择运输方案。一般土石料运输（见运输机械）有无轨、有轨、连续等方式。①无轨运输。除距料场较近（距离小于500m）的土料填筑可用铲运机（挖、装、运、卸各工序自身完成）外，一般多用自卸汽车运输。其优点是效率高、运量大、运距长、机动灵活，能将各种土石料直接卸至工作面的不同位置。②有轨运输。运量大、运费低，但运营管理复杂、线路地形要求较高、轨道工程建设投资大，而且料物不能直接卸至工作面。③连续运输。常用带式输送机，运输成本低、运输强度高，能适应地形崎岖、高差悬殊的料场至工作面的运输任务。从受料至填筑面，散料可以连续作业，无空行程。机动性差，一台带式输送机只能运送一种料物，运输途中一旦发生故障，将迫令全线停工。

土石料压实　土石料的压实工序是工程质量和建筑物安全的关键。土石料压实过程中的铺料厚度及碾压遍数，一般均需根据材料特性和选用的压实设备型号，通过碾压试验确定，以保证建筑物达到设计要求的压实指标。当合格的土石料运至工作面后，需按指定位置顺序卸料，再按规定厚度铺平。常用的土石料压实机械有：①依靠碾重的静力作用使土石料结构破坏，颗粒变位挤紧压实，如平碾、羊足碾和凸块碾，适用于细粒料压实。②依靠土料的搓揉、拌和作用驱除土粒间滞留的空气压实，如气胎碾。③依靠机械的振动频率

和碾重，使土石料颗粒随之振荡，粒间摩擦阻力减小并发生相对位移，从而缩小颗粒间隙压实，如振动碾。④用重锤下落的冲击动能压实，如各种夯实机械，适用于各种黏性或无黏性土料，常用于防渗铺盖、堤身或坝体，一般铺土较厚，击实次数比碾压遍数少。在大型碾压设备所不能压到的边角和接头等特殊部位，常用小型夯实设备补压密实，如截水槽底部、混凝土齿墙两侧、坝体与岸坡或建筑物连接部位。

坝体填筑　特点是土石料填料集中、上坝强度高、填筑方量大和质量要求高、施工工艺比较复杂。一般要求运输过程中，不同坝料应防止掺混、污染和降低物理力学性能。填筑面施工有严密的组织和管理，各工序间相互衔接，分段流水作业：土石料填筑不同高程各部位在施工中有明显标志，填筑作业面碾压层次清楚，大面平整，均衡上升，防止漏压、欠压或超压。根据不同的填筑料，采用不同的填筑方法：①土料。铺土厚度用插扦法或设标志控制，当气候干燥，土表层水分蒸发较快或在运输和散铺过程中含水量损失较大时，铺土与压实表层均要适当均匀洒水润湿，洒水量以能控制在施工含水量范围内为原则。②砂砾料和石料。铺料后均要边洒水边碾压，但软化系数大的石料和在负温下施工时一般不洒水。③反滤料。填筑质量要求较高，铺料厚度控制较严，一般约每10m范围设厚度样板一个，用机械施工时单层水平宽度大于3～4m。填筑中反滤料与防渗土料平起，呈犬牙交错状压实，有先土后砂和先砂后土两种施工方法。犬牙交错带宽一般不大于每层防渗土料厚度的1.5～2.0倍。分段铺筑时要做好接缝，处理各层间的连接，使不发生层间错位、折断或混杂。对已铺好的反滤料要妥善保护，禁止车辆或行人通行，防止与土料混杂和污水浸入。④面板堆石坝的垫层料。要求密实度高而渗透性小，一般采用加工后级配良好的垫层料薄层碾压，靠近上游面的松坡需削坡处理或用斜坡碾压设备碾压。21世纪初素混凝土挤压墙固坡技术在面板垫层料施工中得到广泛应用，简化了施工工序，加快了施工进度。

质量控制　土石料填筑质量控制包括填筑过程控制和压实目标控制。填筑过程控制指标主要包括填筑面铺筑工艺、碾压机具、碾压参数等，压实目标控制指标主要为压实干密度和颗粒级配等。对面板堆石坝，坝料压实质量检查以控制碾压参数为主。（见土石坝施工质量控制）

tuti jiagu

土体加固　(improvement of soil mass)　对不能满足工程要求的人工填土或天然土体采用物理化学方法进行人工处理，改善其力学性质的工程措施。在建筑物地基处理中，除采用桩、地下连续墙、沉箱等深基础外，也可采用土体加固处理措施，以提高其强度、减小变形、控制渗流，从而适应工程建筑物安全和正常运行的要求。土体加固处理分为表层处理和深层处理两大类。前者一般涉及表层3～5m以内的土层，常用的有挖除、换土、垫层、挤淤、压实、设挤密桩、土体加筋、排水固结、掺胶凝材料等措施。深层软弱土体加固方法主要有排水固结、挤密砂桩、强夯、振冲、高压喷射注浆、深层搅拌、灌浆等。其他还有冻结法、热处理法、电渗排水法、电化学加固法等，可在特殊条件下采用。20世纪70年代以来用土工合成材料加固土体的方法得到很大发展。

排水固结　近代沉积的高含水量低密度软黏土层，力学性质很差。在土体自重或外载荷（堆载、抽真空、降低地下水位等）作用下，使土体预先排水固结，可以提高土的密度和粒间有效应力，从而提高强度，减小压缩性。因软黏土渗透性弱，不易固结，常在土体中设置砂井、土工排水板等，以缩短渗径，加速固结过程。一些对沉降不太敏感的建筑物，如堤坝、路基、油罐等，也可以用控制施工速率或加载速率的方法，使软土的强度增长与加载过程相适应，保持软土地基的稳定性。

挤密砂桩　用振动打桩机将带有桩靴的钢套管打入土体内，边拔管，边灌砂，并用振动或捣实法压实，形成密实的桩柱体，与周围被挤密的土体一起，组成复合地基，以提高地基承载力。桩体材料也可用土或灰土，形成土桩或灰土桩复合地基。这种方法对松砂、非饱和松散黏性土、湿陷性黄土等的挤密作用是明显的。对饱和软黏土地基，其挤密作用不大，但较高的置换率（如30%～70%）使砂桩在复合地基中起主要作用，同时也有利于土体的排水固结。

强夯　以重锤在大落高下夯击地面，使土体在巨大冲击能量下压密，提高强度，减小压缩性。其有效深度取决于夯击能量，可达10m以上。对易液化的饱和松砂，强夯可使土体液化，使土粒在重新沉积过程中排列得更为密实。对低密度非饱和土体，如湿陷性黄土、未经压实的填土、松散无黏性土等，强夯可使松散土体压实。对饱和软黏土，配合排水后是否适用尚无一致意见。强夯法施工时振动大，在附近有建筑物的地区要慎用。

振冲　使振冲器在边冲水、边振动作用下沉入土体，至预定深度，然后在边振动、边上提过程中，将砂石料填入振冲形成的孔洞内，并借振冲器的振动作用压密填料，形成砂石桩柱，与周围被振冲、压密的土体一起组成复合地基，提高地基承载力。对无黏性土，主要是振冲加密作用；而对黏性土，则主要是振冲置换作用。振冲法的适用范围与振冲器的功率有关，一般20～30kW的振冲器可用于砂层和黏土层，而70kW以上的大型振冲器可用于砂砾石层。（见振冲）

高压喷射注浆　用高压将水泥浆液通过钻孔底部的喷嘴喷入地层，与被高压射流切割破碎的地层材料混合，边旋转，边提升，边喷射浆液，直至地面。经一定时间后，混合物硬化而成一定直径的桩体，称为旋喷桩，可以与周围地层材料组成复合地基，也可连续成排，作为基坑的围护结构或地基防渗结构。如喷嘴只在一定角度内摆动而不作旋转，可以喷成一定厚度的板墙，作防渗帷幕，称为定喷或摆喷。

深层搅拌　用特制的钻头，在钻孔中一定深度处借机械力量旋转切削土体，同时将水泥或石灰的粉体或浆体通过空心钻杆和钻头上的喷嘴，在压力下喷入土体中，与被切割破碎的地层材料混合均匀，边旋转，边提升，直至地面。在一定时间后混合物凝固成桩体，与原地层一起组成复合地基，以提高地基的承载力。

灌浆　通过钻孔将水泥或其他浆液，在静压力下灌注入地层的裂隙或孔隙内，固化而成具有一定强度和低透水性的结石，起加固和防渗作用，其应用非常广泛。（见灌浆）

tuti wendingxing

土体稳定性 (stability of soil mass) 处于一定时空条件的土体，在各种力系（自然的、工程的）的作用下保持其力学平衡状态的程度。当土体受到荷载作用后，土中各点产生法向应力和剪应力。在剪应力作用下，土体发生剪切变形。若某点剪应力达到该点的抗剪强度，土体即沿着剪应力作用方向产生相对滑动，此时称为该点的强度破坏。如荷载继续增加，则剪应力达到抗剪强度的区域不断增大，最后形成连续的滑动面，使一部分土体相对另一部分土体产生滑动，整个土体强度破坏而失稳。土体稳定性取决于土体强度和变形两大因素。土坡稳定性、地基承载力和挡土结构稳定性，都属于土体稳定性范畴。常用的确定土体稳定性的方法是极限平衡法，还有有限元法和分项系数法等。

土坡稳定性 天然的、人工填筑的和开挖的土质边坡抵抗沿潜在滑裂面发生滑动的安全程度。常用的土坡稳定性分析方法是刚塑体极限平衡法，其中条分法应用最为广泛。它最早由瑞典K.E.彼德森（K.E. Petterson）提出，通常称为瑞典条分法。此法假定土体稳定性是平面应变问题，滑裂面是圆柱面，将滑动土体分成若干垂直土条，不考虑土条间的作用力，见图1。滑裂面上的全部抗滑力与滑动力之比，即土坡的稳定安全系数F_s，可以表示为

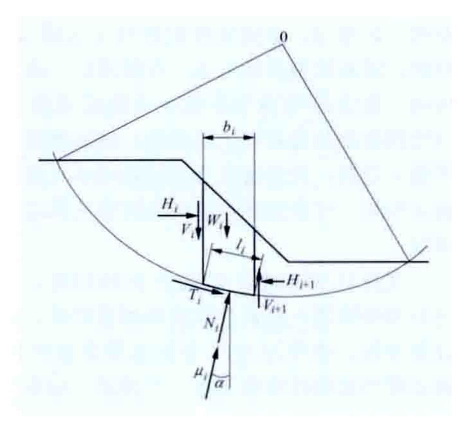


图1 滑动土条上的作用力

W_i—土条自重；V_i、H_i、V_{i+1}、H_{i+1}—条间力；N_i—径向反力；T_i—切向反力；u_i—孔隙压力；b_i—土条宽；l_i—土条底边长；α—倾斜角

$$F_s=\frac{\sum(cl+W\cos\alpha\tan\varphi)}{\sum W\sin\alpha} \tag{1}$$

式中c为黏聚力；l为土条底边长；φ为内摩擦角；W为土条自重。

实践表明，式（1）往往给出偏小的安全系数值，且孔隙水压力越大，误差越大。许多考虑条块间作用力的方法中，以摩根斯坦-泼赖斯（Mogenstern-Price）法最为严格，它导出了满足静力平衡和变形协调的微分方程，再根据边界条件求解，但计算工作量大，必须用计算机实施；简化A.W.毕肖普（A.W. Bishop，1920—1988）法较为简便，它假定土条间作用力的合力呈水平方向，其安全系数的表达式为

$$F_s=\frac{\sum[c'b+(W-ub)\tan\varphi']\Big/\left(\cos\alpha+\dfrac{\tan\varphi'\sin\alpha}{F_s}\right)}{\sum W\sin\alpha} \tag{2}$$

经多次迭代求解，计算结果与其他严格方法很接近，是工程中常用的方法。

土坡稳定分析时，需试算若干滑动面，求出安全系数最小的滑动面，即最危险滑动面，以及相应的安全系数最小值，它必须大于规定的数值，以保证一定的安全储备。现代计算技术的发展，使得自动搜索临界滑裂面成为可能。如果稳定安全系数不够，应考虑采取加固措施。

地基承载力 地基在自重和外载荷作用下抵抗剪切破坏的能力。地基土的一部分沿着图2中的滑裂面发生剪切破坏前的最大载荷称为极限载荷，此时地基对基础的反力称为地基的极限承载力。极限载荷可以采用现场承压板载荷试验确定，也可根据极限平衡理论求解，但由于影响因素很多，尚无严格的一般解析解。一些学者在不同假定的基础上提出了很多计算极限承载力q_{ult}的公式，但都可以写成以下基本形式

$$q_{ult}=N_c c+N_q q+N_\gamma\frac{B}{2}\gamma \tag{3}$$

式中c为土的黏聚力；γ为基础底面以下地基土的密度；q为旁侧载荷；N_c、N_q、N_γ为承载力系数，与土的内摩擦角φ有关。承载力系数的各种公式的计算结果很不一样，但当$\varphi<30°$时差别相对减小，在生产实践中应用较多的是太沙基公式和汉森公式。将极限承载力除以2～3的安全系数后得到地基的允许承载力。采取地基加固措施，增加土体的抗剪强度及增加基础的埋置深度都是提高地基承载力的有效措施。

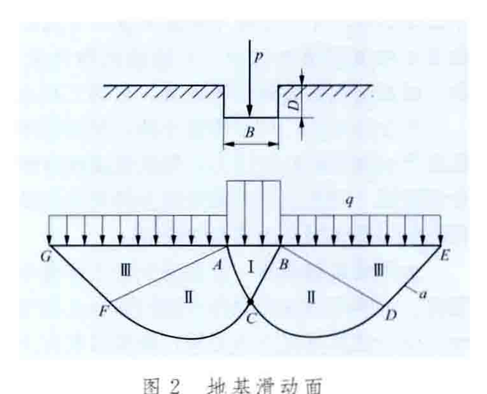


图2 地基滑动面

Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ—极限平衡区；a—滑裂面；p—基础载荷；D—基础埋置深度；B—基础宽度

挡土结构稳定性 挡土结构在自重、外载荷及土压力作用下抵抗滑动和倾覆的安全程度。它在很大程度上取决于作用在挡土结构上的土压力。挡土结构一般分重力式和悬臂式两类，前者靠自重保证其稳定性，而后者靠自重及结构物后面底板上的土重来保证其稳定性。

（1）抗滑稳定性。用抗滑力与滑动力的比值F_s表示其安全度

$$F_s=\frac{(W+E_v)f}{E_h} \tag{4}$$

式中W为挡土结构自重；f为基底摩擦系数；E_v、E_h分别为土压力E的垂直和水平分量（E一般为主动土压力）。

（2）抗倾覆稳定性。用稳定力矩和倾覆力矩的比值F_{sm}表示其安全度

$$F_{sm}=\frac{Wd+E_v b}{E_h h} \tag{5}$$

式中W、E_v、E_h含义同上式，d、b、h含义见图3。

图3 挡土墙上的作用力

挡土结构有许多新形

式，如锚定板式、锚杆式及加筋土挡土结构等，其稳定分析方法各具特点。

参考书目

陈祖煜．土质边坡稳定分析——原理、方法、程序．北京：中国水利水电出版社，2003.

tuti yehua

土体液化

(liquefaction of soil mass) 在排水不畅的条件下，饱和无黏性土或少黏性土在静力或动力荷载作用下，土中孔隙水压力上升，使土骨架上的有效应力降低以至消失，土体由固态变成液态的现象。

土体液化类型及其危害 土体液化分为完全液化和间歇性液化。

完全液化 松散土体在很大的剪应变下仍处于剪缩状态，使土的强度几乎丧失，在静力剪切或循环剪切下都会引起无限度的流动。多发生于饱和、疏松、排水不畅的无黏性土或少黏性土中，常见于地震烈度为Ⅵ度以上的地震区，表现为土体表面喷水冒砂、上部建筑物严重开裂、沉陷或倾倒，以及土坡的流动性滑坡等，可对工程造成严重危害。

间歇性液化 对于密实土体，剪应变增大会使土体因剪胀而产生负值的孔隙压力，导致强度部分恢复，这时在循环剪切作用下会产生以有限变形为特征的间歇性液化，它对工程的危害要比完全液化的小得多。

土体液化势评估 液化势是指土体潜在的发生液化的可能性。影响土体液化势的内部因素有土的组成、密度、结构性、应力状态与应力历史等，外部因素有土体的埋深与排水条件，振动的强度、历时与频率等。土体液化影响因素复杂，难以精确评估。一些简单方法都建立在工程经验的基础上，分别以土体的地质年代、颗粒组成、相对密度、标准贯入击数、液性指数或剪切波速等加上地震烈度作为判别依据。但需要注意的是，前述各种判别方法均有一定的应用条件。定量评估土体液化势，应以现场和室内动力特性试验提供的土体动力参数为基础，进行动力反应分析，以作出评价。此外，振动台模型试验和离心机模型试验也能提供定性或定量的分析。

土体液化防治 防止土体发生液化及其对工程的危害，可以从改良土性、压密土体、改善排水条件和应力条件等方面采取措施。常用的措施有换土、振动压密、排水、压重和围封等（见土体加固）。

tuti yingli-yingbian fenxi

土体应力-应变分析

(stress-strain analysis of soil mass) 根据土力学理论，确定土体在自重和外载荷（建筑物的静、动载荷，渗透力，地震载荷等）作用下产生的应力和位移的方法。土体应力-应变分析的主要目的是评价土体的变形或不均匀沉降是否超过允许值，确定土体的拉力区和剪切破坏区的分布和规模，分析土体出现裂缝、水力劈裂和整体失稳的可能性。由于土体应力-应变关系的复杂性，一般均采用数值方法分析。为此，要建立土的应力-应变关系的数学模型，合理确定计算参数；开发分析计算方法和程序，并对计算成果进行验证。

土的应力-应变关系模型 土的应力-应变关系的数学表达，也称土的本构模型。土体的应力-应变分析成果的合理性很大程度上取决于土体材料本构模型的正确性和模型参数选择的准确性。土的本构特性具有非线性、加工硬（软）化性、静水压力下的屈服性、剪胀（缩）性、压硬性、原生及次生各向异性、拉压不等性、非相关联流动性、弹塑性耦合性、流变性和结构性等特点。同时它还受到应力路径、应力历史、初始应力状态、土体结构、温度、排水条件等多方面的影响。如此复杂的特性，没有也不可能有一种模型会包罗所有的影响因素。在实际应用中，一般是结合具体工程问题，考虑其中影响应力-应变关系的主要因素，通过试验来确定描述本构关系的数学函数表达式及相关计算参数。土的本构关系理论主要分为非线性弹性理论、弹塑性理论和黏弹塑性理论等。

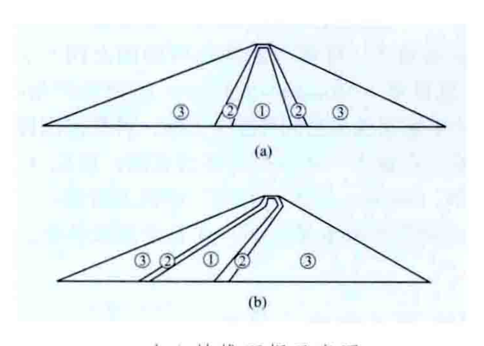
土体应力-应变分析方法 土体应力-应变分析的主要手段是解析法或数值计算方法。早期的研究将土看作弹性体，采用经典的弹性力学方法。例如，在计算地基的应力分布时广泛应用了 J. V. 布辛涅斯克（J. V. Boussinesq）对点载荷作用下的均匀、各向同性的弹性半无限空间应力-应变的理论解。随着数值分析方法（有限元法、边界元法等）的广泛应用，使应力-应变分析能更全面地考虑土的力学特性；可以处理复杂的边界和土层条件；可以模拟土体的开挖、填筑等施工过程；可以通过设置接触面单元来模拟土和建筑物的相互作用；可以求解包含时间因素的固结、动力计算等复杂课题。

在进行土的应力-应变分析的同时，应尽量创造条件，进行原型观测，验证计算成果的合理性，校核、修正或反演计算参数，使应力-应变分析成果更加符合实际。现代土工离心模型试验技术的发展，为验证土的本构关系和数值分析方法的合理性提供了重要手段，同时也开辟了一条使用物理模型研究土的应力-应变的新途径。

tuxinqiang duishiba

土心墙堆石坝

(earth core rockfill dam) 用堆石料或砂砾石料分层碾压填筑、以土质心墙作为防渗体的土石坝。土心墙堆石坝对坝基地质条件的适应性强：由于坝体断面大，水压力和自重作用传递给坝基的压强小，风化岩或河床深覆盖层进行坝基防渗处理后也能修建；能充分利用坝址附近可开采的当地土石材料，经济性好；施工机械化程度高。其缺点是土心墙施工受雨季和冬季冰冻的影响较大。



土心墙堆石坝示意图

(a) 直心墙堆石坝；(b) 斜心墙堆石坝

①—土心墙防渗体；②—反滤层、过渡层半透水区；③—堆石体透水区

按防渗体在坝体中的位置分直心墙堆石坝和斜心墙堆石坝（见图）；按防渗土料的不同，有黏土、黄土类壤土、砾质土、碎石土、风化料等土心墙。

土心墙设计 主要包括防渗土料选择、土心墙断面确定和构造要求。

防渗土料选择 防渗土料是选定土心墙堆石坝的决定因素。一般采用冲积黏土比较简单。如遇黄土类壤土等其他特殊性土，需结合不同地区的特定条件，采取加强压实、做好反滤、多种土料掺合使用等有效措施。还有工程将碎石土风化料、宽级配砾石土作为心墙土料，拓宽了防渗土料的应用范围。

土心墙断面确定 根据防渗土料的允许渗透坡降、塑性指标、抗裂性能、心墙地基性质、地震设计烈度和施工条件等因素确定心墙断面尺寸。心墙厚度自上而下逐渐加厚，顶部宽度考虑机械化施工不小于3m，底部厚度不宜小于水头的1/4。顶部在设计水位以上的超高应满足规范要求，非常运用条件下，顶部不应低于非常运用条件时的静水位，应核算风浪爬高的影响，并预留竣工后沉降超高0.3～0.6m。

构造要求 土心墙厚度较薄，渗透水流的水力坡降大，因此必须设置反滤层和透水区。心墙与坝壳、坝基透水层之间以及下游渗流溢出处，如不满足反滤要求，均应设置反滤层。如心墙与坝壳料之间的反滤层总厚度不能满足过渡要求，可加厚反滤层或加设过渡层。心墙与岩石岸坡或刚性建筑物接触面附近，可扩大心墙断面和加强反滤层。对于建在高地震烈度区、深覆盖层、峡谷地区的坝，或岸坡坡度有突变部位、心墙土料塑性较低、压缩性较大、心墙与坝壳的刚度相差悬殊等情况，应考虑加大心墙上下游侧反滤层和过渡层的厚度。高坝心墙底部与岩基接触面除应设置混凝土盖板外，混凝土盖板下的基岩还应进行帷幕灌浆，心墙底部接触的透水覆盖层亦宜进行浅层铺盖式灌浆。为防止坝体开裂，在高坝心墙顶部、深覆盖层防渗墙和廊道周围、心墙底部、心墙与两岸基岩接触面上填筑铺设一定厚度的高塑性黏土。

坝基及坝基处理 见土石坝。

坝体计算分析 见土石坝。

施工 心墙与岩石接触处，邻近接触面0.5～1.0m范围内应填筑接触黏土，并控制在略高于最优含水率的情况下填筑，在填土前用黏土浆抹面。反滤层、过渡层应压实，在填筑过程中宜与坝体同时上升，且不应有明显的颗粒分离和压碎现象。一般情况下，土心墙堆石坝竣工后的坝顶沉降量不宜大于坝高的1%。（见土石坝施工）

简史 由于土心墙的变形与抛填堆石体的变形比较协调，不致造成土心墙的损坏，在解决了反滤料和土质防渗体地基的防渗处理后，20世纪五六十年代世界上建造了多座坝高超过100m的土心墙堆石坝。60年代后，随着土石方施工中重型振动碾的出现，完成了从抛填堆石到分层碾压堆石的过渡，土心墙堆石坝得到了较快发展。美国1968年建成高235m的奥洛维尔（Oroville）斜心墙坝，土耳其1975年建成高210m的凯班（Keban）土心墙堆石坝，苏联（今塔吉克斯坦）1980年建成高300m的努列克（Nurek）砾石土心墙堆石坝，墨西哥1981年建成高261m的奇科阿森（Chicoasen）坝等。中国已建成多座坝高100m以上的土心墙堆石坝，1964年和1973年分别建成高133m的台湾石门和曾文土心墙堆石坝，2000年建成深厚覆盖层上高160m的黄河小浪底斜心墙堆石坝。坝高正向200m级及以上发展，2010年建成深厚覆盖层上高186m的四川省瀑布沟砾石土心墙堆石坝，2012建成的高261.5m的云南省糯扎渡砾石土心墙堆石坝为同类型中国第一、世界第三高坝，拟建的四川省双江口坝，坝高314m。

参考书目

王柏乐．中国当代土石坝工程．北京：中国水利水电出版社，2004.

tuyali

土压力 (earth pressure)

由土体自重或载荷产生的作用于土体内部或土体作用于结构物上的压力。土压力有侧向土压力和竖向土压力两类。在设计挡土结构物和土中埋管时必须确定土压力的大小、方向和分布。

侧向土压力 挡土结构物上的侧向土压力随结构物的位移方向与大小而变化。结构物静止不动时，它所承受的土压力称为静止土压力；结构物离开土体，直至土体处于极限平衡状态时的土压力称为主动土压力；结构物挤压土体，使其后土体处于极限平衡状态时的土压力称为被动土压力。根据极限平衡理论，以及不同的简化假设，发展了许多计算主动和被动土压力的方法。其中最常用的是W.J.M.朗肯（W.J.M.Rankine）和C.A.库仑（C.A.Coulomb）理论。它们均设墙后土压力呈直线分布，砂土在自重下的侧向土压力表示为

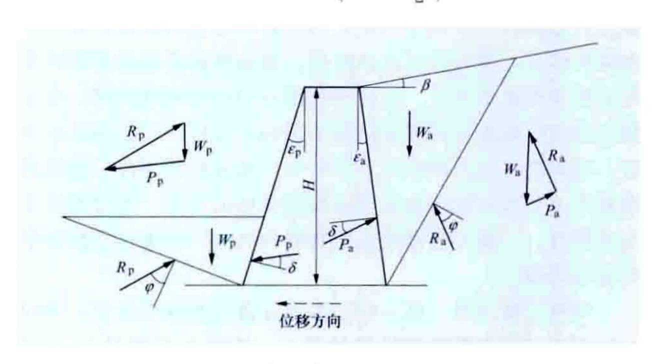
$$P_{a(p)} = K_{a(p)} \times \frac{1}{2}\gamma H^2 \tag{1}$$

式中 K_a、K_p 分别为主动和被动土压力系数；γ 为土的密度；H 为墙高。图示库仑理论通过假设的滑动楔体的力的平衡，确定刚性挡土墙上砂土的主动和被动土压力系数，得到

$$K_{a(p)} = \frac{\cos^2(\varphi \mp \varepsilon)}{\cos^2\varepsilon\cos(\delta \pm \varepsilon)\left[1 \pm \sqrt{\frac{\sin(\varphi+\delta)\sin(\varphi \mp \beta)}{\cos(\delta \pm \varepsilon)\cos(\varepsilon - \beta)}}\right]^2} \tag{2}$$

式中 φ 为土的内摩擦角；δ 为土与墙表面之间的摩擦角；β 为填土表面坡度；ε 为墙背与垂直线的夹角。当墙背垂直光滑、填土表面水平时，式（2）变成朗肯土压力系数

$$K_{a(p)} = \tan^2\left(45° \mp \frac{\varphi}{2}\right) \tag{3}$$



滑动楔体的力的平衡示意图

W_a、W_p—主动和被动滑动土楔重量；R_p—滑动面上的抗剪强度；P_a、P_p—主动和被动土压力

对黏性土以及填土上置有超载，特别是填土和墙体具有复杂的几何形状时，采用基于库仑理论的图解法求土的主动和被动土压力比较简便，即将若干滑动楔体的力矢图顺序画

在一起，确定临界楔体和相应的土压力。

竖向土压力　作用于土中埋管上的竖向土压力与埋土方式有关。在地基中挖沟铺设，而后埋土的管道称为沟埋式管。由于沟壁对填土的摩擦力，使管上的竖向土压力小于其上覆土重。在天然地基上直接铺设后填土的管道称为上埋式管。由于管道两侧填土沉降较大，对管上填土有向下的摩擦力，使管上竖向土压力大于管道的上覆土重。在土体中水平穿洞而埋设的管道或隧洞，其上竖向压力常用塌落拱理论计算。

土压力的影响因素　柔性挡土结构物上土压力的分布和大小受结构物柔性变形影响。地震作用会使挡土墙上的主动和被动土压力发生不利变化，使土压力分布不再为直线，使合力作用点抬高。黏性填土的膨胀性和流变性、填土的湿度和温度、冰冻及地下水位变化、施工程序等对土压力均有影响。锚固设施和土工合成加筋材料等新工艺和新材料的应用，也给土压力问题提出新的课题。20 世纪 60 年代以来，人们开始用各种土的本构关系数学模型和界面模型通过有限单元法，考虑土与结构物的共同作用，确定土压力的大小与分布。

tuiyizhi nisha

推移质泥沙　(bed load)　在一定水流条件下，沿河床滑动、滚动或跳跃前进的泥沙，一般多为粗沙、砾石和卵石等粗颗粒。河床泥沙除受重力和浮力作用外，促使床面泥沙起动的主要是垂直水流方向的上举力和平行于水流方向的拖曳力（或称推移力），故推移质泥沙的输移或静止主要决定于床面流速。由于床面流速的脉动性和泥沙颗粒在床面所处位置的不同，推移质泥沙运动具有随机性和间歇性，其运动速度小于水流速度。

推移质的运动　天然河流的推移质主要以跃移和层移运动，胡春宏通过试验研究，证明了在一般河流水流强度范围内跃移是推移质运动的主要形式，推移质的群体运动常以沙波形式出现。当水流速度大到一定程度，受水流的紊动作用，部分较细的推移质泥沙被冲起卷入到水流漩涡中，随水流悬浮运动，成为悬移质泥沙。一旦水流强度减弱，悬移质中较粗的泥沙又会沉落到床面成为推移质。虽然推移质与悬移质所遵循的运动规律不同，但两者不能截然分开，在一定水流条件下，两者可以互相转换。划分推移质与悬移质在实际工程中有重要意义。因这两种泥沙的运动机理不同，在工程中造成的问题和处理的措施也不同。如挟沙水流进入水库后，推移质泥沙多淤积在水库淤积三角洲的尾部段，而悬移质则成为三角洲顶坡段和前坡段淤积物的主体。当降低库水位冲沙时，一般对悬移质淤积物较为有效，而推移质淤积物则不易冲刷。

推移质输沙率　在一定的水流及床沙组成条件下，单位时间内通过过水断面的推移质数量，常用的单位是 kg/s 或 t/s 。预报河流的推移质输沙率是水利水电工程人员的重要课题之一，但迄今尚未很好解决，一方面是对推移质运动规律认识不够，另一方面还缺乏精确地测量推移质输沙率的工具和方法。探求推移质输沙率公式的途径主要有 7 种。

(1) 以大量试验资料为基础推导的公式，以梅叶-彼得 (Meyer Peter) 公式为代表

$$g_b = \frac{\left[\left(\frac{n'}{n}\right)^{3/2}\gamma hJ - 0.047(\gamma_s - \gamma)d\right]^{3/2}}{0.125\left(\frac{\gamma}{g}\right)^{1/2}\frac{\gamma_s-\gamma}{\gamma_s}}$$

式中 g_b 为推移质单宽输沙率；n' 为河床平整情况下的沙粒曼宁糙率系数；n 为曼宁糙率系数；γ 和 γ_s 分别为水和沙粒的容重；h 为水深；J 为河流坡降；d 为沙粒直径；g 为重力加速度。

(2) 通过一定的力学分析建立起来的理论公式有 R. A. 拜格诺 (R. A. Bagnold) 公式

$$g_b' = \frac{u_* - u_{*c}}{u_*} \times \frac{\tau_0 u}{\tan\alpha}\left[1 - \frac{5.75u_*\log\left(\frac{0.4h}{md}\right) + \omega}{u}\right]$$

式中 g_b' 为以水下重量计的推移质单宽输沙率；u_* 为摩阻流速；u_{*c} 为起动摩阻流速；τ_0 为水流作用在床面上的剪切力；u 为流速；α 为摩擦角；m 为与水流强度有关的系数；ω 为泥沙沉速；其余符号含义同上。

(3) 采用概率论与力学相结合的办法建立的公式，如 H. A. 爱因斯坦 (H. A. Einstein) 公式

$$1 - \frac{1}{\sqrt{\pi}}\int_{-B_*\psi-1/\eta_0}^{B_*\psi-1/\eta_0} e^{-t^2}\,dt = \frac{A_*\varphi}{1+A_*\varphi}$$

$$\varphi = \frac{g_b}{\gamma_s}\left(\frac{\gamma}{\gamma_s-\gamma}\right)^{1/2}\left(\frac{1}{gd^3}\right)^{1/2}$$

$$\psi = \frac{\gamma_s-\gamma}{\gamma} \times \frac{d}{R'_b J}$$

式中 φ 为推移质输沙强度函数；ψ 为水流强度函数；R'_b 为与沙粒阻力有关的水力半径；t 为水流将泥沙举起完全脱离床面的时间；常数项 η_0、A_*、B_* 通过试验求得，分别为 $1/\eta_0=2$，$A_*=43.5$，$B_*=0.143$；其余符号含义同上。

(4) 以爱因斯坦或拜格诺的有关概念为基础，通过量纲分析而得到的 F. 英格伦 (F. Engelund) 公式

$$g_b = \frac{9.3d\gamma_s}{\beta\sqrt{\Theta}}u_*(\Theta - \Theta_c)(\sqrt{\Theta} - 0.7\sqrt{\Theta_c})$$

$$\Theta = \frac{\tau_0}{(\gamma_s-\gamma)d}$$

式中 β 为动摩擦系数；Θ 为决定推移质运动强度的水流参数；τ_0 为作用在周界上的剪切力；Θ_c 为泥沙起动的 Θ 值；其余符号含义同上。

(5) 以流速为主要参变数的推移质输沙率公式，如 Г. И. 沙莫夫 (Г. И. Шамов) 公式

$$g_b = 0.95d^{1/2}\left(\frac{u}{u_c/1.2}\right)^3(u - u_c/1.2)\left(\frac{d}{h}\right)^{1/4}$$

式中 u 为断面平均流速；u_c 为泥沙的起动流速；其余符号含义同上。

(6) 根据能量平衡观点建立的推移质输沙率公式，如窦国仁公式

$$g_b = \frac{0.1}{C_0^2}\frac{\gamma\gamma_s}{\gamma_s-\gamma}(u-u_c)\frac{u^3}{g\omega}$$

$$C_0 = 2.5\ln(11H/\Delta)$$

式中 C_0 为无尺度谢才系数；Δ 为河床凸起度；H 为水深；其余符号含义同上。

(7) 从泥沙交换的统计理论出发，韩其为给出了一维非均匀推移质输沙率和级配计算公式。

断面推移质总输沙率

$$Q_b = \sum_{L=1}^{M} Q_{b,L} = \sum_{L=1}^{M} K_2 K_3 q_b(L) B' P_{1,L}$$

推移质级配 $P_{b,L} = Q_{b,L}/Q_b$

$$q_b(L) = K_1 \rho_s D_L \omega_{1,L} \left(\frac{v_{b,L}}{\omega_{1,L}}\right)^{m1}$$

式中 K_2 为天然河道不均匀沙分组推移质输沙校正系数；K_3 为河道横向流速分布不均匀性对输沙率的影响系数；M 为泥沙粒径组数；B'为推移质有效输沙宽度；$P_{1,L}$为有效床沙级配；$P_{b,L}$为推移质级配；$q_b(L)$为粒径为 L 组的均匀沙推移质单宽输沙率；K_1 和 m_1 分别为系数和指数；ρ_s 为泥沙密度；D_L 为第 L 组泥沙颗粒粒径；$\omega_{1,L}$为第 L 组泥沙的特征速度；$v_{b,L}$为作用在颗粒上的底部流速。

参考书目

钱宁，万兆惠．泥沙运动力学．北京：科学出版社，1983.



waijiaji

外加剂 (additive) 为改善混凝土性能，在拌制混凝土时掺进的少量化学制剂及工业副产品等。外加剂是配制混凝土及水泥砂浆的重要辅助材料，产品多数为粉剂或液体，使用时需加水调和或稀释。

分类 外加剂按其性能可分为：①改善流态混凝土和易性，起减水作用，如减水剂、塑化剂、加（引）气剂等；②改善混凝土含气量，起表面活性作用，如引气剂、发泡剂等；③改变混凝土凝结与硬化速度，如早强剂、缓凝剂、速凝剂等；④增强混凝土某些物理性能，如抗冻剂、防水剂、防霜剂、染色剂等；⑤减小混凝土硬化过程中的体积收缩，如膨胀剂等；⑥提高抗化学作用能力，如防腐、防酸蚀和抑制碱活性骨料（见混凝土骨料）反应的材料等；⑦提高抗生物作用能力，如杀菌剂、杀虫剂、防霉剂等。许多外加剂是多功能的，也有由几种材料制成的复合剂。水电工程常用外加剂主要有减水剂、引气剂、缓凝剂、早强剂、速凝剂、防冻剂、防水剂、加气剂及膨胀剂等。

减水剂 属表面活性剂，它能使水泥颗粒分散，释放水泥颗粒间多余的水分，掺入混凝土后在保持原有工作度的条件下，能显著减少用水量，从而降低水灰比，使混凝土强度提高。如果保持强度不变，就可节约水泥用量。所以，减水剂在大体积混凝土中使用效益最高。减水剂有普通型、缓凝型和高效型等不同种类，在水工混凝土中均大量应用。普通型减水剂以木质素磺酸盐最为常用，它是由纸浆废液中提取的木质素衍生物制成的。缓凝型减水剂在水工混凝土应用较多的是糖蜜，它是制糖工业的残液。高效型减水剂以萘和萘系磺酸盐（萘系减水剂）为主，减水效果好于普通型和缓凝型，减水率达15%～25%。聚羧酸类高效减水剂也开始大量使用，减水效果更好。

引气剂 一般属阴离子表面活性剂，掺有引气剂的混凝土在搅拌时能引入定量均匀分布的微小气泡，从而提高混凝土工作度。微小气泡可以阻止固体颗粒沉降和水分上升，使泌水性减少。这些微小气孔还能使混凝土抗冻性大大提高，但含气量增大常使混凝土抗压强度降低，因此有些国家对掺引气剂混凝土的含气量作出规定，中国标准DL/T 5100—1999《水工混凝土外加剂技术规程》规定的引气剂混凝土含气量为4.5%～5.5%。

缓凝剂 能延缓水泥水化速度和凝结时间，但对后期强度无不良影响的外加剂，常用的有柠檬酸、糖蜜、磷酸二氢钠等。大体积混凝土使用缓凝剂，延长了初凝时间，降低了混凝土仓面浇筑强度，放慢了水泥发热，有利于混凝土早期散热，并可少量降低最高温升。缓凝剂掺量要严格控制，以免影响混凝土强度和增加泌水。

早强剂 能缩短水泥凝结时间，提高早期强度而对后期强度无损的外加剂。分无机物与有机物两类。常用的无机物如氯化物系和硫酸盐系，常用的有机物如三乙醇胺等。此外，还有无机与有机的复合剂。早强剂适用于混凝土冬季负温施工或预制件生产。氯盐对钢筋有锈蚀性，须限制掺量，也可与阻锈剂，如亚硝酸钠等一起使用。

速凝剂 对水泥有强力促凝作用并提高早期强度的外加剂，如水玻璃、石膏、硫酸钠等，它适用于喷射混凝土和喷射水泥砂浆。掺速凝剂后，水泥初凝一般只要几分钟时间，所以拌制混凝土或砂浆时，必须随用随配。在安装工程中常用速凝剂固定小型埋件。

防冻剂 能降低水泥浆液冰点的外加剂。它使流态混凝土和水泥砂浆在一定负温下不冻结，能保持工作度并维持水泥水化反应，在一定时间内达到预期强度，避免混凝土和水泥砂浆早期遭受冻害。

防水剂 能提高混凝土密实性、耐久性，起防止渗漏作用的外加剂。它常用在水工建筑物临水面及地下工程中配制自防水混凝土或配制防水水泥砂浆，用作建筑物外部的防潮止水面层。

加气剂 加气剂的功能与引气剂类似，但与引气剂是两种不同的外加剂。加气剂是指能在混凝土或砂浆拌合物浇灌过程中起化学作用，放出如氢、氮、氧等气体的外加剂，能使混凝土或砂浆体积膨胀成多孔结构。世界上应用最成熟、最广泛的加气剂是鳞片状的铝粉。

膨胀剂 能使混凝土体积少量膨胀的外加剂，如石膏、铝粉、氧化镁等。它常用在填充部位、埋件部位、构件接头部位的混凝土以及补强工程中。

发展概况 外加剂是从加气剂和减水剂的发现和研究开始的。1934年，美国在研究公路路面混凝土开裂和剥落现象的试验中发现，在硅酸盐水泥中掺入树脂和油类，能改善混凝土性能，从而研制成加气剂。20世纪30年代，在混凝土中掺入亚硫酸纸浆废液作为减水剂取得了良好效果，40年代逐步研制成木质素系减水剂。自50年代以来，许多国家开展了各类外加剂的研究生产，取得了飞跃进展。六七十年代，萘系高效减水剂在日本、德国开始使用并广泛使用至今。1986年，日本公司开发出聚羧酸减水剂，并在1997年推向市场。2000年以后，聚羧酸减水剂在中国长江三峡水利枢纽、龙滩水电站工程中开始使用并迅速推广。外加剂已成为配制混凝土中除水泥、骨料和水以外的另一种必要材料。

Wanjiazhai Shuili Shuniu

万家寨水利枢纽 (Wanjiazhai Hydroproject) 位于中国黄河中游北干流托克托至龙口河段峡谷内，左岸隶属山西省偏关县，右岸为内蒙古准格尔旗。枢纽为引黄入晋工程的起点，主要开发任务是供水结合发电调峰，兼有防洪、防凌综合利用，见图1。装机容量1080MW，多年平均年发电量27.5亿kW·h，以220kV电压向山西和内蒙古供电。

水文和水库特性 坝址以上流域面积39.5万km^2。多

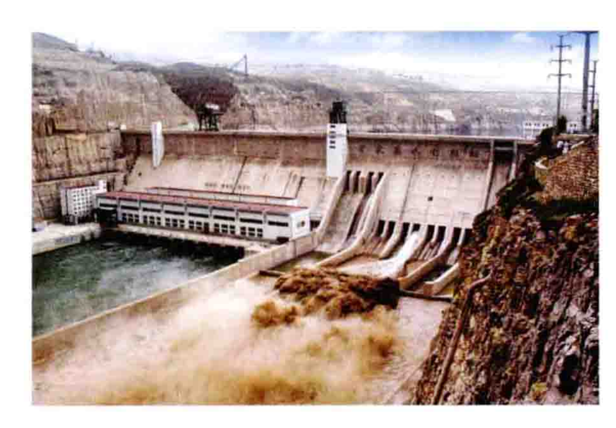


图 1　万家寨水利枢纽

年平均年径流量 192 亿 m^3。1000 年一遇设计洪水流量 16 500m^3/s，相应库水位 974.99m；10 000 年一遇校核洪水流量 21 200m^3/s，相应库水位 979.10m；正常蓄水位 977.00m。采用“蓄清排浑”运行方式，排沙期运行水位 952～957m，冲刷水位 948.00m。水库总库容 8.96 亿 m^3，调节库容 4.45 亿 m^3。

枢纽布置　枢纽工程由大坝、泄水建筑物、厂房等组成，见图 2。

大坝　半整体式混凝土重力坝，坝顶高程 982.00m，坝顶长 443m，最大坝高 105m。

泄水建筑物　坝体有 8 个泄流底孔，孔口尺寸为 4m×6m（宽×高），孔口底坎高程 915.00m，最大单宽流量 89m^3/(s·m)；4 个中孔，孔口尺寸为 4m×8m（宽×高），孔口底坎高程 946.00m，最大单宽流量 82m^3/(s·m)；1 个 14m×10m（宽×高）表孔，堰顶高程 970.00m，最大单宽流量 49.5m^3/(s·m)。泄洪设施的泄流能力，在设计情况下为 7899m^3/s，在校核情况下为 8326m^3/s。在电站进水口下设排沙孔，共 5 孔。排沙孔进口底坎高程 912.00m，孔径 2.7m。

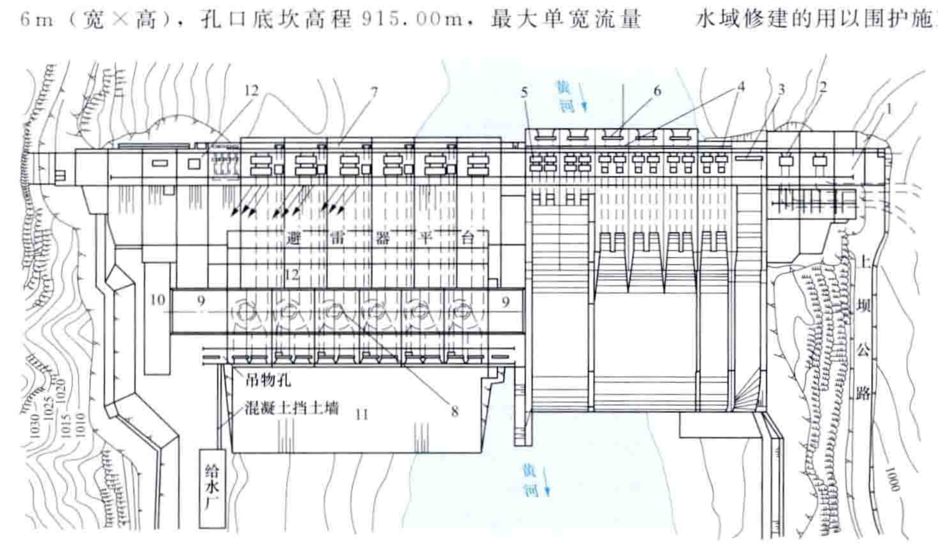


图 2　万家寨水利枢纽平面布置图

1—左岸非溢流坝；2—引黄取水口；3—溢流表孔；4—底孔；5—中孔；6—导流底孔；7—电站坝段；8—电站主厂房；9—安装场；10—副厂房；11—尾水渠；12—右岸非溢流坝段

左岸非溢流坝段上布置有 2 个引黄取水口，向晋蒙能源基地供水。采用分层取水方式，取水库上层清水。取水闸门为下沉式活动平面闸门，门顶溢流，闸门可随水位的涨落而升降。取水口内径为 4m。库水位为 957.00m 时，单孔引水流量为 24m^3/s。

厂房　布置在坝后，主厂房长 196.5m（包括两个安装场，分别长 31.50m 和 21.00m），厂房上部宽 27m，下部宽 43.25m，总高 57.7m。厂内装 6 台单机容量为 180MW 的混流式水轮发电机组。水轮机转轮直径 5.8m，额定转速 100r/min，额定出力 183.7MW，最大出力 204.1MW，额定工况点效率不低于 91.7%。发电机额定功率 180MW，额定功率因数 0.9，额定电压 15.75kV。升压变电站采用 SF_6 全封闭组合电器，布置在厂坝之间，电压等级 220kV。

工程施工　施工采用分期导流方案。一、二期上下游横向围堰均为土石围堰。一、二期度汛纵向围堰为混凝土围堰。导流标准为 20 年一遇洪水，设计流量 8350m^3/s。工程于 1993 年开始施工准备工作，1994 年主体工程开工，1998 年 11 月第一台机组发电并具备供水条件，2002 年通过竣工验收。

主要工程量：土石方开挖和回填 117.83 万 m^3，混凝土和钢筋混凝土 184.71 万 m^3，帷幕灌浆 1.666 万 m，固结灌浆 5.439 万 m，排水孔 1.735 万 m。

设计单位　天津勘测设计研究院（现中水北方勘测设计研究有限责任公司）。

weiyan

围堰　(cofferdam)　为创造施工条件，在河、湖等水域修建的用以围护施工场地的临时挡水建筑物。水工建筑物施工有不同的施工导流方式。当用断流围堰导流时，需用围堰将全部河床拦断；当用分期围堰导流时，则用围堰先后围住河床的不同部分，这时不仅要有基本垂直于水流流向的横向围堰，还要有顺水流方向的纵向围堰。要求围堰挡水的时段也因导流方式而不同，有的要求按全年考虑，洪水期也要求围堰挡水；有的只要求围堰在一定的枯水时段挡水，洪水期允许从围堰上过水。设计允许过水的围堰称过水围堰。

对围堰的基本要求一般为：①在规定的设计标准情况下，结构稳定，满足防渗、抗冲和强度的要求；②结构简单，施工方便，尽量利用当地材料及开挖渣料；③地基易于处理，堰体便于与岸坡或已有建筑物连接；④便于拆除；⑤在平面布置上要考虑基坑施工的需要；⑥满足导流泄水建筑物水流平顺，过水围堰还需做好堰面的过水保护；⑦具有良好的技术经济指标。有的情况下，围堰可与主体工程结合，构成主体工程的组成部分，则需满足对永久建筑物的要求。例如，土石围堰有时作为土石坝体的一部分；混凝土纵向围堰常与永久建筑物的隔墙、导墙结合。

围堰可以利用多种材料修建。常用的主要材料有土石、混凝土、钢板桩、草料、钢材、木材等。按所采用的材料，

相应称为土石围堰、混凝土围堰、钢板桩围堰、草土围堰、钢围囹木挡板围堰、木笼围堰等。

土石围堰　用土料、砂砾料或石渣修建的围堰，能充分利用当地材料，对地基的适应性强，构造简单，施工方便，必要时也便于加高培厚。按堰体采用材料的不同，可分为：①主要用土料填筑或水力冲填而成的土围堰；②主要用石料填筑的堆石围堰；③土料和石料均占相当比例的土石混合围堰。除均质土围堰采用单一土料外，其他各种围堰的堰体均设有心墙或斜墙防渗体。防渗体可采用满足防渗要求的土料，如砂壤土、风化料或砾质土料；也可采用混凝土防渗墙、钢板桩、复合土工膜、水泥灌浆、木板等。土石围堰的地基覆盖层防渗处理方式应力求施工简单、造价低、工期短，可采用齿槽截水墙、铺盖、混凝土防渗墙、高压喷射灌浆、水泥或水泥黏土灌浆等。在水中抛填施工的土石围堰，堰体和地基可采用相同的防渗材料防渗，也可采用不同的防渗材料防渗。

对土石围堰采用堰面防冲工程措施后，可用作过水围堰，一般在土石围堰的堰面上铺设、浇筑有排水孔的混凝土面板；或铺设前后阶梯状搭接的混凝土楔形板，堰趾处设置混凝土挑流平台，后接钢筋石笼护脚。为使过堰水流平顺及防冲面板的稳定，土石过水围堰的上、下游坡度比较平缓。

中国水口水电站二期上游围堰，最大高度44.5m，地基覆盖层及下部水中抛填的堰体采用塑性混凝土防渗墙，上部堆石堰体高约26.5m，采用主膜厚0.8mm两侧粘有无纺布的复合土工膜作防渗心墙。土工膜垂直向采用“之”字形布置，膜两侧填筑砂砾料保护。土工膜之间采用粘接剂粘接。中国长江三峡水利枢纽二期上游土石围堰，最大高度82.5m，水下部分堰体及堰基采用塑性混凝土防渗墙防渗，上部堰体采用土工膜防渗，防渗墙最大深度74m。

混凝土围堰　用混凝土修建的围堰，堰体断面较小，抗渗抗冲性能好。堰顶可以溢流，能适应较大的上、下游水位差，也可用作过水围堰。混凝土围堰对地基条件要求较高，宜用于岩基。这种围堰既可用作横向围堰，也常用作纵向围堰。混凝土围堰的主要形式有重力式和拱形两种。采用分期围堰导流施工的工程，常用重力式混凝土围堰作为纵向围堰，两侧均可挡水，两期工程可以兼用，并可与主体工程结合，作为永久建筑物的隔墙、导墙。当堰址河谷狭窄且地基和两岸地质条件良好时，可用混凝土拱围堰。混凝土拱围堰比混凝土重力式围堰断面小，可节省混凝土量。与常规混凝土围堰相比，碾压混凝土围堰可以降低造价，缩短工期，应优先采用。中国大朝山水电站工程的上游围堰为碾压混凝土双曲拱过水围堰，最大高度53.5m，混凝土总方量10万m^3，施工时间近3个月。

钢板桩围堰　用特制的钢板桩组成的围堰，抗冲能力强，断面较窄，既可用于岩基，又适用于软基，并可作过水围堰。钢板桩回收率高，可重复使用。钢板桩互相连接，可布置成单排、双排或格形体，以格形体用得最多。格型体围堰又可组成圆筒形、扇形或花瓣形等不同形式，格体内填以砂、砂卵石或石渣等。钢板桩围堰最高挡水水头小于30m，一般在20m以下。这种围堰需用大量钢材，对施工机械化的要求较高，应用受到限制。

草土围堰　用稻草、麦草等草料和土料修建的围堰，可就地取材，施工简便，具有一定的抗冲、防渗能力，适应地基变形能力强，可在流水中修建。利用草土埽工于黄河堵口工程，是中国一种传统的河工技术。20世纪50年代以后，将这种传统的施工方法应用于中国青铜峡、盐锅峡、八盘峡等水利水电工程，修建草土围堰。它是用草捆、散草、土料，一层层铺草、压土，从岸边向水中进占，形成围堰。草土围堰一般适用于水深不超过10m，流速不超过3.5m/s的情况。草料易于腐烂，因此使用期限不宜太长。

钢围囹木挡板围堰　用型钢作立柱、横梁和拉杆，焊接成框格结构，用木挡板作外壳，内部填防渗土料形成的围堰，面板底部与基岩接合处用袋装混凝土封底。丰满水电站的机组扩建工程均采用此种围堰，最大高度17.5m。这种围堰断面较小，抗冲能力强，也较易拆除。

木笼围堰　用圆木或方木纵横叠合，用螺栓连接成框格结构，内部填石形成的围堰，能承受较高的水头，抗冲能力强，断面较小，顶部浇筑混凝土盖板后，可用作过水围堰。这种围堰耗用木材较多，制造、沉放、拆除均不方便，已较少采用。

weimu guanjiang

帷幕灌浆

(curtain grouting)　在岩石或砂砾石地基中为建造防渗帷幕进行的灌浆。帷幕可由单排或2～3排灌浆孔组成。当岩石完整、透水性小时，可采用单排；当岩石破碎、裂隙发育、透水性大、地质条件复杂时，则多采用2～3排。排距、孔距一般多通过工地灌浆试验后确定。

单排帷幕的灌浆孔常分为三个次序，依序施工。双排孔帷幕的施工次序为先灌下游排孔，后灌上游排孔。三排孔帷幕则先灌下游排孔，再灌上游排孔，最后灌中间排孔。

帷幕灌浆的灌浆孔较深，均采用分段灌浆法，并且常采用循环灌浆的方式。

钻孔宜采用回转式钻机和金刚石或硬质合金钻头钻进，也可采用冲击式或冲击回转式钻机钻进。钻孔的孔深、倾斜度和方位角应符合设计要求。

帷幕灌浆采用水泥浆，由较稀浆开始，逐级或越级变浓。水泥浆的水灰比（质量比）通常分为5、3、2、1、0.8、0.6（或0.5）六个比级。当吸浆量大时，灌浆也可从较浓浆开始。灌浆结束标准为：①自上而下分段灌浆法。灌浆段在最大设计压力下注入率不大于1L/min后，继续灌注60min可结束灌浆。②自下而上分段灌浆法。在该灌浆段最大设计压力下注入率不大于1L/min后，继续灌注30min可结束灌浆。③孔口封闭灌浆法。在规定的压力下，吸浆量不大于1L/min，继续灌注60～90min可结束灌浆。另外，有些国家主张采用水灰体积比小于5的较浓浆进行灌注，有些国家则建议采用水泥基质稳定性浆液（即在低水灰比的水泥浆中加入少量的膨润土，制成析水率小的稳定性浆液）进行灌注。

灌浆设计多遵循渗入性灌浆理论，以此为基础确定灌浆压力。也有一种新的张裂式灌浆理论，主张采用高压将岩石中的裂隙撑大张开，以提高岩石的可灌性。

对于有涌水压力和涌水量的灌浆孔，在灌浆前需先测记涌水压力和涌水量，并应根据具体情况，制定特殊的灌浆工艺和采用必要的技术措施。

帷幕灌浆结束后，应钻检查孔，并做压水试验，以检验

帷幕的防渗性能，如不能满足设计要求，则需增加灌浆孔，补做灌浆，直至达到设计要求为止。

weishuiguan

尾水管 (draft tube) 位于转轮后的出水管段，利用转轮出口水流的位能和部分动能，并将水流排至下游的部件。尾水管是水轮机过流通道的一部分，其基本类型有直锥形和弯肘形两种。

直锥形尾水管 如图1所示，一般整锥角 $\theta=10°\sim14°$，出口流速 $v_s=1.5\sim3.5\text{m/s}$，$L/D_3=3\sim4$。管内水流均匀，阻力小，能量回收系数高，结构简单，易于制造，用于小型、卧式水轮机和贯流式水轮机上。

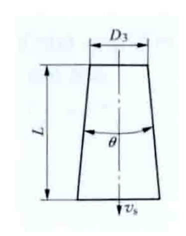


图1 直锥形尾水管

弯肘形尾水管 水力性能不如直锥形，但可减少挖深，广泛应用于大中型反击式水轮机。从底环平面至尾水管底板间的高度 h 是影响尾水管性能的关键尺寸，一般通过模型试验确定。尾水管由进口锥管A、肘管B及出口扩散管C三部分组成，见图2。进口锥管为直圆锥形，扩散整锥角一般为14°~20°，出口扩散管为矩形或扁圆形断面扩散管。肘管为连接进口锥管和出口扩散管的过渡段，当出口扩散管的宽度 B_s 大于10~12m时，因结构需要可在管内加支墩。由于蜗壳的平面不对称，尾水管中心线在平面上偏转一个角度，以减小机组段宽度。另一种弯肘形尾水管只用于小型卧轴水轮机，它由等圆断面90°弯管和直圆锥形扩散管组成，结构简单，制造容易，但流态较差。

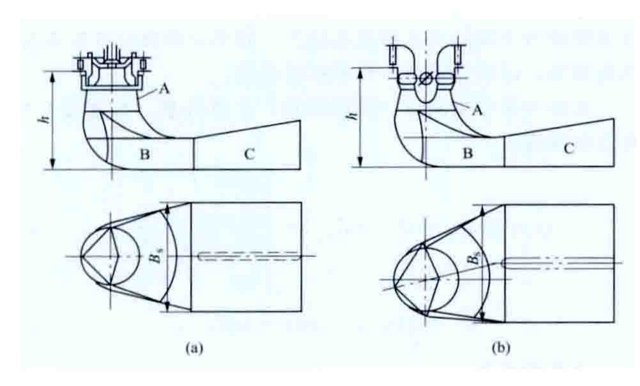


图2 弯肘形尾水管

(a) 混流式水轮机弯肘形尾水管；(b) 轴流式水轮机弯肘形尾水管

尾水管一般用钢筋混凝土浇筑，为防止水流对混凝土的冲刷，进口锥管用钢板里衬保护，保护钢板一直延续到水流速度6m/s左右的地方。有时整个肘管甚至出口扩散管都用钢板里衬。大型里衬在工厂成型，分段分瓣运到工地组焊。进口锥管上设有进人孔及验水阀，尾水管最低点设排水阀。当转轮需从下部拆出时，尾水管锥管是可拆卸的。

weishuiguan jinkou zhenkongzhi

尾水管进口真空值 (vacuum value at draft tube inlet)

水轮机或水泵水轮机在水力过渡过程中尾水管进口出现的最小压力值。由于该压力通常表现为负压，一般采用真空值表示，故将其称为尾水管进口真空值。一般通过输水系统水力过渡过程计算不同工况下机组甩负荷过程中的尾水管进口真空值。以计算成果为基础，结合工程经验，经分析并留有适当裕度后确定尾水管进口真空允许值。尾水管进口真空允许值是电站调节保证值之一，也是尾水系统结构设计的重要依据之一。为了保证尾水管进口断面不产生液柱分离，避免出现危及机组运行安全的尾水系统“反水锤”现象，常规机组尾水管进口真空允许值不应大于0.08MPa。

weishuiqu

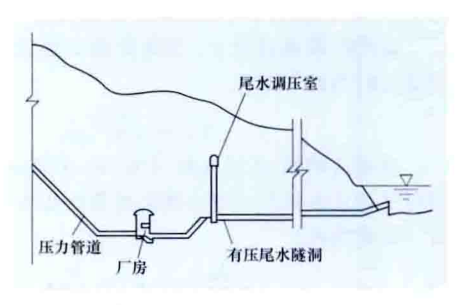
尾水渠 (tailwater channel) 将发电尾水从尾水管或尾水隧洞出口排至下游河道的渠道。尾水出流尚有部分余能，有一定的冲刷能力，故尾水渠的起始段常用混凝土衬护。尾水渠由渐变段和正常渠段组成。尾水管出口处水深大，正常渠段水深与河道相似，两者中间设渐变段，水深由深变浅，渠底形成反坡，一般反坡不宜陡于1∶4。尾水渠在平面布置上要求平顺，出流均匀，不形成回流。当尾水渠出口的水流可能受到水库泄洪水流的影响时，应设置向下游延伸足够长度的导水墙，避免泄洪时尾水位波动及淤积等不利情况影响机组的正常运行。尾水渠流速、纵坡、边坡坡度及衬砌等设计原则与引水明渠类似。

weishui suidong

尾水隧洞 (tailwater tunnel) 将发电尾水从尾水管出口（或下游调压室出口）排至下游河道的隧洞。分无压与有压两种。其布置要防止水流明满流交替，以免产生气垫爆破。尾水隧洞出口一般应设检修闸门。当几台机组合用一条尾水隧洞时，在尾水管出口处设有事故闸门。确定尾水隧洞的经济流速和衬砌种类的原则，见引水隧洞。

无压尾水隧洞 一般用于水位变幅不大的河道，可不设尾水调压室，需保证洞顶留有足够空间，在流量变化时，涌浪不致封塞洞顶。无压尾水隧洞横断面常做成圆拱直墙型。

有压尾水隧洞 常用于水位变幅较大的河道，当尾水隧洞较长时，需设尾水调压室，以减少水击压力（见图）。尾水隧洞内水压力不大，横断面多采用圆拱直墙型、马蹄型或圆型。



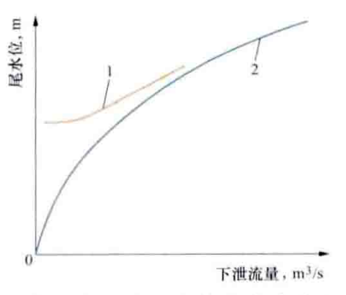
有压尾水隧洞示意图

weishuiwei

尾水位 (tail-water level) 水电站厂房尾水管（洞）出口处的河水位。尾水位是确定水电站工作水头的参数之一，取决于水电站厂房尾水管（洞）出口处的水位流量关系及其下泄流量。

在水电站下游无梯级电站、隘口或其他礁滩等回水顶托的情况下，水电站厂房尾水管（洞）出口处的水位流量关系曲线为天然情况下的水位流量关系曲线；当存在上述回水顶

托时，则为回水情况下的水位流量关系曲线；当电站下游有淤积现象发生时，水位流量关系曲线还应计及淤积的影响。



尾水位与下泄流量的关系曲线
1—受回水顶托时；2—不受回水顶托时

水电站下泄流量包括电站发电流量、弃水流量和其他下泄流量。

水电站施工时，应避免在厂房下游堆渣，引起电站尾水位抬高而造成水电站能量和容量的损失。对于中、低水头水电站，此问题尤其重要。

尾水位与下泄流量的关系曲线见图。

wenliu

紊流 (turbulent flow) 黏性流体质点互相掺混，各点的运动要素呈不规则脉动的流动状态。又称湍流。O. 雷诺(O. Reynolds，1842—1912) 最先通过管道水流试验揭示了紊流和层流是实际流体的两种基本运动形态，当雷诺数 $Re=\rho vd/\mu>10^4$ 时，流体的流动形态一般呈紊流型，自然界的流体运动大多属此。

紊流分为两类：流场内存在流速梯度者为剪切紊流，不存在流速梯度者为各向同性紊流。工程技术领域常见的流动多为剪切紊流，它又按紊动产生条件划分为自由紊流（如水射流）和近壁紊流（如边界层）。

紊流起因于外来扰动和流体的黏性。扰动通过黏性作用的传递，使流场内遍布尺度大小不同的各种旋涡，因而流场内某一点的流动要素都具有随机脉动的性质，但从统计学角度它们又都存在确定的统计平均值。紊流运动各流动要素的瞬时值可视为时均值和脉动值的叠加，即

压强 $p=\overline{p}+p'$

流速 $u=\overline{u}+u'$

式中 $\overline{p}$ 及 $\overline{u}$ 为时均值；p' 及 u' 为脉动值。

紊流的紊动强度 T_u 用速度脉动值的方均根值 $\sqrt{\overline{u'^2}}$ 除以速度时均值 $\overline{u}$ 表示

$$T_u=\sqrt{\overline{u'^2}}/\overline{u}$$

雷诺从纳维-斯托克斯（Navier-Stokes）运动方程出发，进行平均化运算后而导出紊流运动的基本方程，亦称雷诺方程（张量形式）

$$\rho\frac{\mathrm{d}u_i}{\mathrm{d}t}=\rho F_i+\frac{\partial}{\partial x_j}p_{ij}$$

式中 ρ 为流体密度；F_i 为单位质量力；最后一项是单位体积上应力张量 p_{ij} 的散度。

上列雷诺方程加上连续方程所组成的方程组不封闭。为此，紊流研究发展了各种补充关系式，主要有关于紊动剪应力的半经验理论、关于各向同性紊流的统计理论、关于剪切紊流的随机理论，如 1887 年 J. V. 布辛涅斯克（J. V. Boussinesq）紊动黏性系数假说、1925 年 L. 普朗特（L. Prandtl，1875—1953）混合长度学说、1935 年 G. I. 泰勒（G. I. Taylor）脉动流速相关矩理论，其后 T. V. 卡门（T. V. Karman）、A. H. 柯尔莫哥洛夫（A. H. Колмогоров）和中国周培源都在紊流统计理论方面有所建树，还有依据随机理论对剪切紊流的相关函数和谱函数进行的分析研究等。

雷诺管流试验指出：在充分发展了的紊流中，阻力系数（λ）与流动雷诺数无关，只是边壁相对糙度 k_s/r（k_s 为糙高，r 为管道半径）的函数，如

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}}=a\log\frac{r}{k_s}+b$$

通常采用 $a=2$，$b=1.74$（见水流阻力）。这时，管道水流阻力损失与平均速度的二次方成正比。紊流中近壁时均速度分布，常用普朗特-卡门（Prandtl-Karman）给出的对数形式或布拉修斯（Blasius）建议的指数形式表示。

参考书目

Hinze J O. Turbulence. New York：McGraw-Hill Publishing Co.，1975.

窦国仁．紊流力学．北京：人民教育出版社，1981.

woliu

涡流 (vortex flow) 流场中流体微团发生旋转的流。又称有涡（有旋）流动。涡流起因于流体固有的黏性和外来的扰动，其特征是流体微团间产生相对运动和相互掺混，从而将流体内的部分机械能转化为热能而耗散。

自然界常见的涡流现象很多，如大气中的龙卷风，船只前进时船尾后面的涡列，桥墩下游的涡旋，液体容器出流孔附近的涡旋，河流瀑布、跌水下游的翻腾流态等。还有很多涡流现象，单凭肉眼是观察不到的，如流体运动中普遍存在着的紊流，其内部就充满着尺度不同的大小涡旋。涡流内部都存在着剪切变形并伴有能量消耗。

水电工程中研究涡流有着现实的意义：一方面可利用涡流消能，如水电站泄水建筑物过水时采用的水跃消能；另一方面则致力于减轻涡流的能量损失，如水力机械设计旨在使涡流减弱，以减少阻力，提高机械效率。

流体力学中以涡量（旋涡向量）Ω 或环量（环流量）Γ 来表示涡流

$$\Omega=2(\vec{\omega}_x+\vec{\omega}_y+\vec{\omega}_z)=\begin{vmatrix} i & j & k \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ u & v & w \end{vmatrix} \tag{1}$$

$$\Gamma=\oint(u\mathrm{d}x+v\mathrm{d}y+w\mathrm{d}z) \tag{2}$$

两者关系为

$$\Gamma=\int_s\Omega\mathrm{d}s \tag{3}$$

式中 ω 为流体微团的旋转角速度；ω_x、ω_y、ω_z 及 u、v、w 分别表示旋转角速度及线速度在直角坐标系 3 个方向的分量。

涡流和势流是表征流体运动特性的一对专用名词。当 $\Omega\neq0$ 时，为涡流；当 $\Omega=0$ 时，为势流。

woke

蜗壳 (spiral case) 蜗状的有压引水室。它向导水机构均匀供水，并使水轮机进水形成一定环量。蜗壳回绕在导水机构四周，从进口开始断面逐渐缩小，形如蜗牛壳。断面变化规律一般采用等速度矩法（$v_u r$ 为常数）或等速度法（v_u 为常数），也有两者相结合的。蜗壳分混凝土蜗壳和金属蜗壳两种。蜗壳的最低点设排水管，适当的位置装有进人门。

混凝土蜗壳　通常用于水头小于 40m 电站的水轮机上，一般为 T 形断面，见图 1。T 形断面的高、宽比（b/a）一般

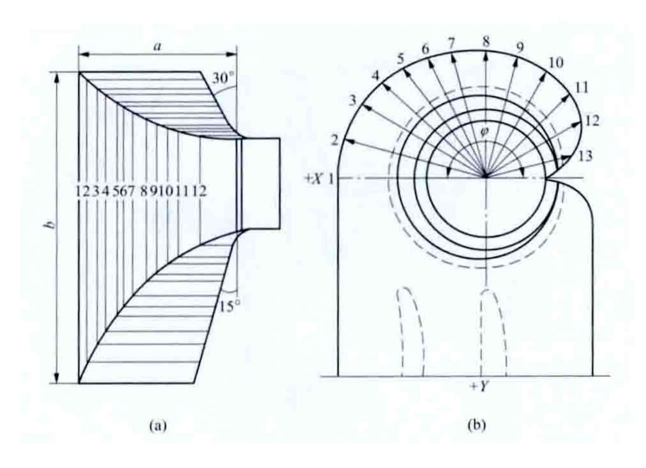


图 1　包角 $\varphi=180°$、T 形断面混凝土蜗壳

(a) 蜗壳剖面图；(b) 蜗壳平面图

在 1.5～2.0 之间，包角在 135°～270°之间，常用 180°，必要时通过模型试验确定。蜗壳内侧为座环。

金属蜗壳　应用十分广泛，其制造方法有焊接、铸焊和铸造 3 种，水头较低的小型水轮机可用铸铁蜗壳，大多水轮机蜗壳采用钢板焊接或铸钢铸造。其断面为圆形，见图 2。由于结构上的原因，接近尾部的几节采用椭圆形断面。包角一般为 345°～360°，蜗壳内侧为座环，蜗壳和座环一般用蝶形边连接，也可采用无蝶形边的箱形结构。绝大多数焊接蜗壳考虑单独承受内水压力，有的考虑蜗壳与混凝土联合受力。钢板焊接蜗壳在工厂成型焊成整体，有时根据运输条件焊成数段运至工地焊接或现场卷板制作。

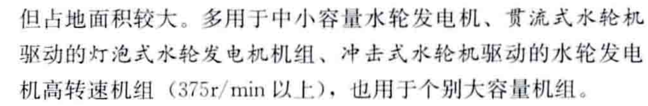
图 2　金属焊接蜗壳

(a) 立体图；(b) 剖面图

woshi shuilun fadianji

卧式水轮发电机　(horizontal hydro-generator)

转轴与地面平行布置的水轮发电机。水轮机与水轮发电机布置在同一水平面上，结构上要考虑转子自重引起的挠度，轴的刚度相应要求高。卧式机组可降低厂房高度，节省开挖量，

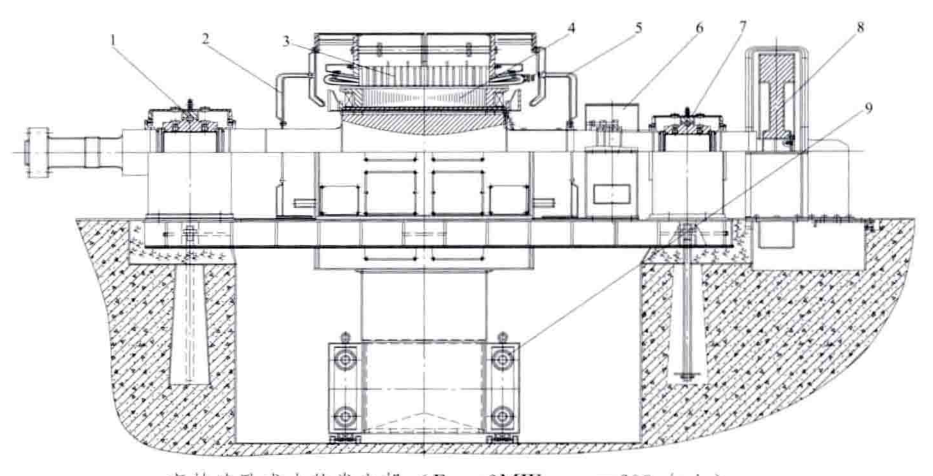


但占地面积较大。多用于中小容量水轮发电机、贯流式水轮机驱动的灯泡式水轮发电机机组、冲击式水轮机驱动的水轮发电机高转速机组（375r/min 以上），也用于个别大容量机组。

卧式水轮发电机的轴承承受转动部件的重量，推力轴承承受转动部件的轴向力，通常要设置两个或三个轴承。两个轴承结构的机组轴向长度短，结构紧凑，安装调整方便。当轴承负荷较大时，则采用三轴承结构。高转速卧式水轮发电机结构见图。轴系临界转速应大于机组飞逸转速的 1.2 倍。轴承多采用座式滑动轴承，对于大、中容量的灯泡贯流式水轮发电机采用具有推力轴承的复合式轴承。

小容量卧式水轮发电机定子多为整体结构。大、中容量卧式水轮发电机由于外形尺寸较大，为适应吊运及拆装工艺要求，定子常采用分瓣结构，即分成上、下两部分，合缝处用销钉定位并用螺栓紧固。

卧式水轮发电机的冷却方式常用有表面冷却式、通风冷却式、管道通风冷却式和循环冷却式。表面冷却完全靠机壳表面散热，适用于容量较小的封闭式电机。通风冷却式适用于开启式电机，冷却介质为空气，空气进入电机内部吸收热量后又向周围散热，冷却效果较好。管道通风冷却式是通过管道将冷却空气送入电机，吸收热量后又经管道排出，同样具有较好的冷却效果。循环冷却式的冷却系统自成闭合回路循环，一次冷却介质吸收的热量通过闭合回路中的冷却器传递给二次冷却介质（一般为水），冷却效果较好，常用于大、中型卧式水轮发电机。



高转速卧式水轮发电机（$P_N=6MW$，$n_N=600r/min$）

1—径向、推力轴承；2—后端盖；3—定子；4—转子；5—前端盖；6—集电装置；7—径向轴承；8—辅助飞轮；9—空气冷却器

卧式水轮发电机一般用于中、小容量机组，仅在少数大型水电站或抽水蓄能电站采用。例如，奥地利科鲁斯（Kops）水电站采用单机容量为 102MV · A 的卧式机组，瑞士格里姆塞尔（Grimsel Ost）抽水蓄能电站采用单机容量为 100MV · A 的卧式抽水蓄能机组，德国霍贝尔格威尔（Hornberg Wehr）抽水蓄能电站采用单机容量为 290MV · A 的卧式抽水蓄能机组。中国以礼河水电站采用单机容量为 36MW 的卧式水轮发电机。

Wujiangdu Shuidianzhan

乌江渡水电站　(Wujiangdu Hydropower Station)

位于中国长江支流乌江中游，贵州省遵义市以南 55km 处，

是中国在喀斯特地区兴建的第一座大型工程，见图1。电站开发任务以发电为主，装机容量1130MW，多年平均年发电量40.56亿kW·h，以220kV和110kV电压向四川和贵州送电。



图1 乌江渡水电站

水文和水库特性 坝址以上流域面积27 790km²，多年平均流量483m³/s，多年平均年径流量152亿m³。主要工程建筑物按500年一遇洪水设计，5000年一遇洪水校核。设计洪水流量19 200m³/s，相应库水位760.30m；校核洪水流量24 400m³/s，相应库水位762.80m；水库正常蓄水位760.00m，死水位736.00m。水库总库容21.4亿m³，调节库容9.28亿m³，死库容12.12亿m³，防洪库容1.6亿m³，为季调节水库。

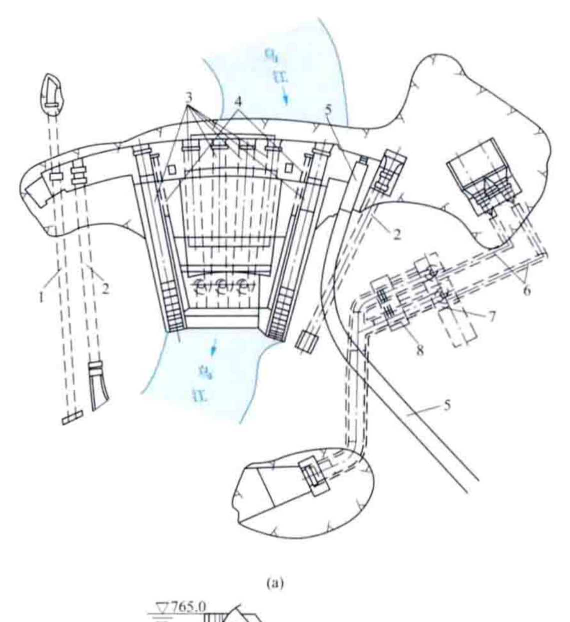
工程地质条件及基础处理 坝址基岩为石灰岩，地质复杂，两岸喀斯特及暗河发育，坝肩附近洞穴容积达8万m³，坝脚下游50m处有厚达80m的软弱页岩及破碎带。基础防渗采用水泥灌浆帷幕。帷幕线沿坝轴线向两岸上游延伸，总长约1000m，帷幕底线最深处延伸至河床以下200m，帷幕体总面积为18.9万m²。右岸坝肩部分地段设置了混凝土防渗墙。河床以上较大溶洞用回填混凝土处理，深部溶洞用高压灌浆处理。运行后，在120m工作水头下，每24h渗漏20m³。

枢纽布置 枢纽工程由大坝、泄水建筑物、厂房、通航建筑物等组成，见图2。

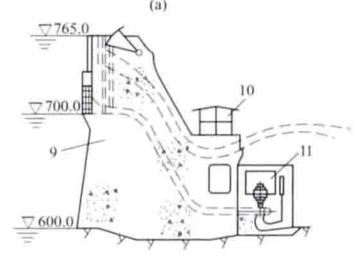
大坝 混凝土拱形重力坝，最大坝高165m，坝顶高程765.00m，顶部弧长368m。坝后主厂房为全封闭式厚壁框架结构，长106m。

泄水建筑物 坝上有6孔溢洪道（其中左、右两侧靠岸边的2孔为滑雪道式结构），采用厂前挑流，挑坎高程742.00m，孔口尺寸13m×19m，最大泄流量15 600m³/s。坝身有2孔兼做排沙用的泄洪中孔，孔口尺寸4m×4m，底坎高程680.00m，最大泄流量1154m³/s。左右两岸各有1条泄洪洞，进口孔口尺寸9m×10m，底坎高程720.00m，最大泄流量4130m³/s。在760.30m设计洪水位时，总泄流量达18 000m³/s，最大单宽流量230m³/（s·m），最大流速41m/s。此外，右岸还有1条放空洞。大坝溢流时水舌由坝上挑坎挑出，经厂房上空挑落至下游河床。

厂房 包括坝后式厂房和地下厂房。坝后式厂房内安装3台水轮发电机组，单机容量210MW；水轮机转轮直径5.2m，额定转速150r/min；发电机为半伞空冷型，额定电压15.75kV，额定功率因数0.875。地下厂房位于左岸，内



(a)



(b)

图2 乌江渡水电站枢纽布置图

(a) 平面布置；(b) 坝体剖面

1—放空洞；2—泄洪隧洞；3—溢洪道；4—泄洪中孔；5—通航建筑物；6—扩机引水隧洞；7—扩机厂房；8—主变压器洞；9—大坝；10—220kV高压配电装置；11—厂房

安装2台水轮发电机组，单机容量250MW；水轮机转轮直径4.95m，额定转速150r/min；额定电压15.75kV，额定功率因数0.875。主变压器安装在主厂房上游的副厂房和主变压器洞内，高压出线用电缆引出。220kV高压配电装置采用气体绝缘金属封闭电器，布置在溢洪道挑坎侧墙上架设的桥上。

工程施工 工程1974年开工，1979年首台机组发电，1983年竣工。扩机工程2000年10月开工，2003年8月首台机组发电，2004年竣工。

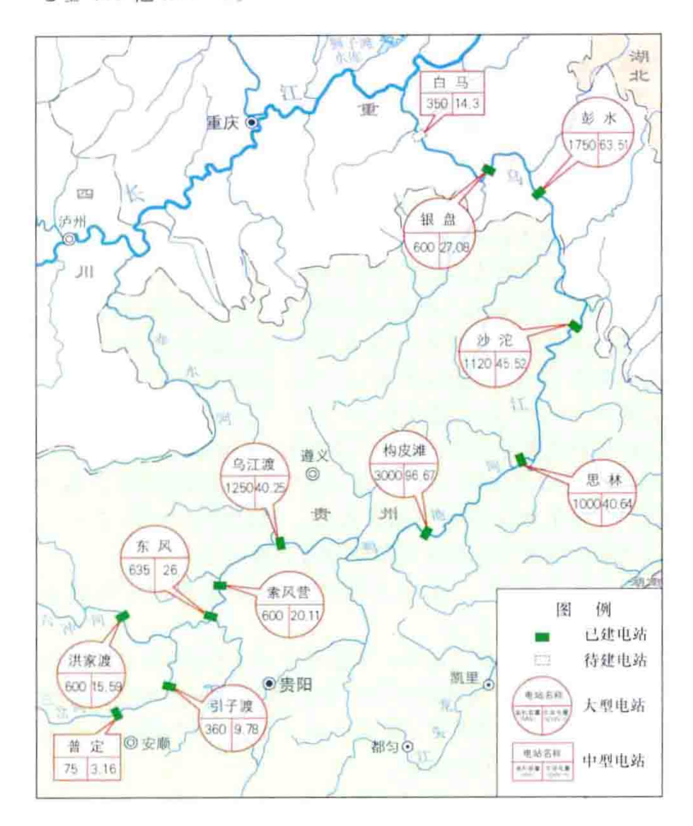
设计单位 中南勘测设计研究院（现中国水电顾问集团中南勘测设计研究院）。

Wu Jiang shuidian guihua

乌江水电规划

(hydropower development planning of Wujiang River) 根据原国家计划委员会批复的《乌江干流规划报告》（计国土〔1989〕502号），乌江梯级开发方案为北源六冲河上的洪家渡，南源三岔河上的普定、引子渡，乌江干流的东风、索风营、乌江渡、构皮滩、思林、沙沱、彭水、大溪口等11级水电站。根据国家发展和改革委员会批复的《重庆市乌江干流彭水至河口梯级开发方案研究报告》（发改办能源）〔2007〕2723号），彭水至河口河段由大溪口一级开发改为银盘、白马两级开发。乌江梯级规划电

站 12 座（见图），总装机规模为 11 575MW，多年平均年发电量 409 亿 kW·h。



乌江梯级水电站布置图及开发现状

乌江是长江上游右岸最大的一条支流，发源于贵州省西北部乌蒙山东麓，分南、北两源，南源三岔河和北源六冲河汇合后始称乌江，流经贵州省和重庆市，于涪陵市汇入长江。乌江干流河长 1037km（三岔河源头起），天然落差 2124m，流域面积 87 920km²，多年平均年径流量 505 亿 m³。乌江属典型的峡谷型河道，两岸多悬崖峭壁，河道狭窄，滩多流急。

乌江干流梯级的开发任务主要是发电，其次是航运，兼顾防洪及其他。乌江梯级电站距用电负荷中心较近、地形地质条件较好，水库调节性能好而淹没损失相对少，已建成了洪家渡（多年调节）、构皮滩（年调节）和彭水（年调节）等调节能力好的水电站。

乌江梯级中普定、引子渡、洪家渡、东风、索风营、乌江渡、构皮滩、思林、彭水、银盘等 10 座水电站已经投产发电，总装机容量 9930MW；沙沱水电站正在建设，总装机容量 1120MW；白马水电站正在开展可行性研究阶段的勘测设计工作，装机容量 525MW。

Wusite-Yilimu Shuidianzhan

乌斯特-伊里姆水电站 (Ust-Ilim Hydropower Station)

位于俄罗斯西伯利亚安加拉河上，布拉茨克水电站下游 300km 处。近期装机容量 3840MW，远景装机容量 4320MW，多年平均年发电量 217 亿 kW·h。以 220kV 高压和 500kV 超高压输电线路分别向西伯利亚联合电力系统和地区工业综合体送电。电站开发任务除发电外，还有航运作用。220kV 出线 6 回，500kV 出线 3 回，并留有 4 回 220kV 和 1 回 500kV 的出线位置。

水文和水库特性 坝址以上流域面积 78.3 万 km²，多年平均流量 3220m³/s，多年平均年径流量 1016 亿 m³。水库正常蓄水位 296.00m，相应库容 594 亿 m³，水库面积 1892km²。水库调节库容 28 亿 m³，其上游来水由贝加尔湖和布拉茨克水电站的水库进行调节。坝址区最大洪水流量 14 900m³/s。

工程地质条件 坝址区基岩为坚硬的辉绿岩。

枢纽布置 枢纽工程由大坝、泄水建筑物、厂房等组成。

大坝 由河床部分的混凝土重力坝和两岸连接土坝等组成，挡水前沿总长 3840m。混凝土重力坝最大坝高 105m，坝顶长 1452m。

泄水建筑物 溢流坝段位于河床左侧，长 242m，共设 11 个溢流孔，孔口宽 15m、高 12m，最大泄流能力为 9700m³/s。

厂房 坝后式厂房，长 440m（含安装场长 44m）。压力钢管直径 7.8m，外包钢筋混凝土。厂房内可装 18 台单机容量为 240MW 的混流式水轮发电机组；现已装 16 台，装机容量 3840MW。水轮机转轮直径 5.5m。高压开关站设于右岸。

工程施工 工程于 1967 年开始修建围堰，1975 年初头 3 台机组投入运行，1979 年装机达 16 台，还有 2 台机组待安装。

主要工程量 混凝土浇筑 468 万 m³，土方开挖 212 万 m³，石方开挖 188 万 m³，填筑土石方 709 万 m³。

Wuqiangxi Shuidianzhan

五强溪水电站 (Wuqiangxi Hydropower Station)

位于中国湖南省沅陵县境内沅江干流上，上距沅陵县城 73km，下距常德市 130km。工程开发任务以发电为主，兼有防洪和航运等综合利用效益，见图 1。电站装机容量 1200MW，多年平均年发电量 53.7 亿 kW·h。以 3 回出线 500kV 输电线路接入华中电网。



图 1　五强溪水电站

水文和水库特性 坝址以上流域面积 83 800km²。多年平均流量 2040m³/s，多年平均年径流量 643 亿 m³，多年平均年输沙量 1660 万 t。水库正常蓄水位 108.00m，相应库容 29.8 亿 m³；死水位 90.00m，死库容 9.7 亿 m³；水库防洪限制水位 98.00m，防洪库容 13.6 亿 m³。拦河坝按 1000 年

一遇洪水 55 900m³/s 设计，相应库水位 111.62m，相应库容 35.1 亿 m³；按 10 000 年一遇洪水 67 300m³/s 校核，相应库水位 114.70m，相应库容为 42.0 亿 m³。水电站厂房及通航建筑物按 100 年一遇洪水设计，1000 年一遇洪水校核。

工程地质条件 坝址岩性为前震旦系板溪群的石英岩、砂岩、板岩及千枚状板岩，软硬相间，具有次复理式构造。经多次构造运动的挤压破坏，结构面胶结不良。左岸断裂集中形成地质复杂地段。坝基渗漏以沿层间裂隙及破碎带的顺层为主。地震基本烈度为Ⅵ度。

枢纽布置 枢纽工程由大坝、泄水建筑物、厂房及通航建筑物等组成，见图 2。

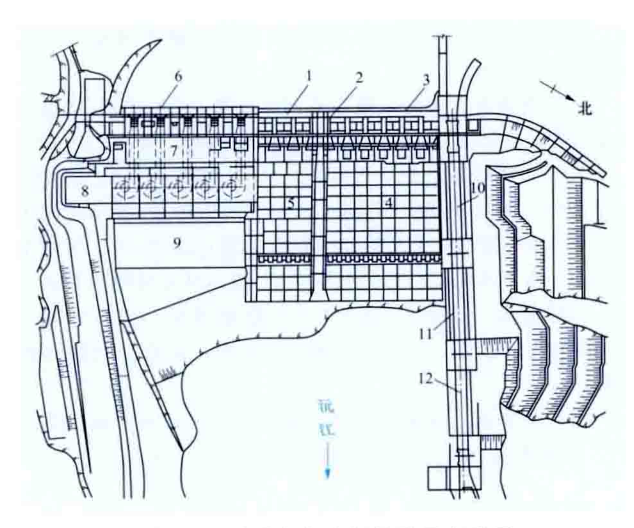


图 2　五强溪水电站枢纽平面布置图

1—表孔；2—坝中孔；3—坝底孔；4—左消力池；5—右消力池；6—厂房；7—开关站；8—安装间；9—尾水渠；10—船闸；11—二闸室；12—三闸室

大坝　混凝土重力坝，坝顶高程 117.50m，最大坝高 85.83m，坝顶总长 724.00m。

泄水建筑物　溢流坝位于河床左侧主河槽。采用表孔宽尾墩＋底孔挑流＋消力池联合消能工。设有：19m×23.3m（宽×高）表孔 9 个，堰顶高程 87.80m，设计泄流量 41 485m³/s，最大泄流量 50 989m³/s；9m×13m（宽×高）中孔 1 个，底坎高程 76.00m，最大泄流量 2586m³/s；设在闸墩内的 3.5m×7m（宽×高）底孔 5 个，进口底部高程 67.00m，最大泄流量 3015m³/s。

厂房　坝后式，位于河床右侧，包括安装间全长 251m，宽 36.5m，高 68m。内装 5 台单机容量为 240MW 的混流式水轮发电机组。水轮机转轮直径 8.6m，最大水头 60.1m，最小水头 36.2m，额定水头 44.5m，额定功率 248MW，额定转速 68.2r/min，最高效率 95%，设计点效率 90.85%。发电机单机额定容量为 266.67MV·A，额定功率因数 0.9，额定电压 15.75kV。主变压器和高压配电装置布置在厂坝之间。主变压器为三相强油水冷式，单台容量 300MV·A。高压配电装置为 500kV 气体绝缘金属封闭电器。

通航建筑物　连续三级船闸位于左岸，总跨越水头 60.9m。

综合利用 除发电外，可将下游 159 万亩农田的防洪标准由 5～10 年一遇提高至 20 年一遇。改善上下游航道约 240km。设计过坝年货运量 250 万 t，设计年过木量 45 万 t，远景可通行 2×500t 驳船。

工程施工 施工采用分期导流方式。工程于 1986 年开工，1994 年第一台机组发电。

主要工程量：土石挖方 2234 万 m³，土石填方 168 万 m³，混凝土 406.6 万 m³，钢材 7.31 万 t。

设计单位 中南勘测设计研究院（现中国水电顾问集团中南勘测设计研究院）。



Xiluodu Shuidianzhan

溪洛渡水电站 (Xiluodu Hydropower Station)

位于中国四川省雷波县和云南省永善县交界的金沙江干流上，坝址距离宜宾市河道里程184km。工程开发任务以发电为主，兼顾防洪、拦沙和改善下游航运条件等综合利用，见图1。电站装机容量13860MW，多年平均年发电量572.4亿kW·h。水库配合其他措施，可使川江沿岸的宜宾、泸州、重庆等城市的防洪标准逐步达到城市防洪规划拟定的目标，并可减少长江中下游分洪量，提高防洪能力。通过水库调节可增加下游向家坝、三峡、葛洲坝电站保证出力755MW，枯水期电量35.2亿kW·h，多年平均年发电量18.8亿kW·h。右岸电厂以2回500kV输电线路送电广东电网，左岸电厂采用±800kV直流输电线路送电华东电网。



图1 溪洛渡水电站

水文和水库特性 坝址以上流域面积45.44万km^2。多年平均流量4660m^3/s，多年平均年径流量1470亿m^3。1000年一遇设计洪水流量43700m^3/s，相应库水位600.63m；10000年一遇校核洪水流量52300m^3/s，相应库水位608.90m，总库容128亿m^3；正常蓄水位600m，相应库容115.7亿m^3；死水位540.00m，调节库容64.6亿m^3，属季调节水库；汛期限制水位560.00m，防洪库容46.5亿m^3。

工程地质条件 坝址由二叠系上统峨眉山玄武岩组成，岩体坚硬、完整。坝址区地震基本烈度Ⅷ度，设计烈度9度。

枢纽布置 枢纽工程由大坝、泄水建筑物、引水发电系统等组成，见图2。

大坝 混凝土双曲拱坝，最大坝高285.5m。坝顶高程610.00m，坝顶弧长710.98m，坝顶宽14m，最大坝底厚69m，厚高比0.242，弧（长）高比2.49，最大中心角96.21°。

泄水建筑物 共有3套泄洪设施。坝顶7个溢流表孔，堰顶宽度12.5m，堰顶高程586.50m；坝身8个深孔，孔口尺寸为6.0m×6.7m，出口底高程499.50～501.00m；岸边泄洪洞左右岸各2条，均为有压接无压泄洪洞，工作闸门尺寸为14.0m×12.0m，进口高程545.00m。

枢纽整体消能设计泄洪建筑物采取“分散泄洪、分区消能”中坝身采用“分层出流、空中碰撞、水垫塘消能”的布置形式，表孔出口为大差动齿坎，深孔出口为压力上翘型或下弯型，坝后设水垫塘和二道坝。岸边泄洪隧洞出口采用扭曲斜切挑坎，两岸对称挑流、水下碰撞消能。

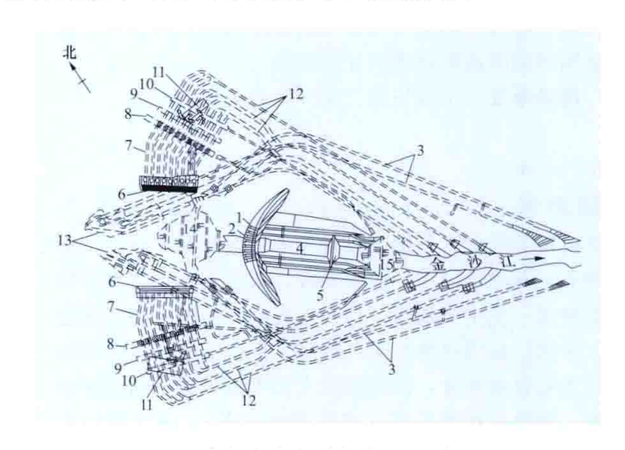


图2 溪洛渡水电站枢纽平面布置图

1—拱坝；2—坝身泄洪孔口；3—泄洪洞；4—水垫塘；5—二道坝；6—电站进水口；7—压力钢管；8—厂房；9—主变压器室；10—调压室；11—500kV出线场；12—尾水洞；13—导流洞；14—上游围堰；15—下游围堰

引水发电系统 分左、右岸布置，各安装9台机组。左岸进水口为露天竖井布置，右岸进水口为岸塔式，见图3。左、右岸均采用单机单管引水，各9条直径为10m的压力管道。尾水调压室为“三机一室、三室并排”，为长廊式，调压室尺寸为300m×23m×94m（长×宽×高）。左、右岸各3条断面尺寸为15m（或18m）×20m的尾水隧洞。



图3 溪洛渡右岸电站进水塔工程

两岸各设一地下厂房，尺寸均为381.03m×28.4m×75.1m（长×宽×高），各安装9台单机额定容量为770MW的混流式水轮发电机组，转轮直径7.5m，额定水头197m，最大水头229.4m，最小水头149.5m。水轮机和发电机额定

效率分别为93.8%和98.8%。地下主变压器室设9台容量为855MV·A的500kV三相升压变压器。GIS布置在主变压器室内，地面设500kV出线场，左、右岸各2条电缆竖井。

工程施工 施工导流采用左、右岸导流隧洞和断流土石围堰的全年导流方式。工程于2005年12月开工，2007年11月截流，2103年7月首台机组成功并网发电，计划2014年底全部机组投产发电。

主要工程量：土石方明挖1967.9万m^3，石方洞挖1575.6万m^3，混凝土浇筑1305.5万m^3，土石方填筑268.6万m^3，帷幕灌浆76.7万m，固结灌浆71.3万m，钢筋总量68.0万t，金属结构安装约5.8万t。

设计单位 国家电力公司成都勘测设计研究院（现中国水电顾问集团成都勘测设计研究院）。

建设单位 中国长江三峡开发总公司。

xianlu celiang

线路测量

（route survey） 为河道、渠道、公路、输电线路等线形工程勘测设计所进行的测量工作。一般包括初测和定测两个阶段。初测是对方案研究中认为有价值的几条线路或一条主要线路，结合现场实际情况，在实地进行选点、插旗，标出线路方向，然后沿选定线路开展平面控制测量与高程控制测量，测定插旗点的平面位置（初测导线）和高程，测绘带状地形图（或初测地形图），供线路初步设计使用。定测是对已批准的初步设计所选定的线路方案，利用带状地形图上初测导线和设计路线的几何关系，将选定的线路测设到实地上去。定测工作包括带状地形测量、中线测设及纵横断面测量，并为线路施工图设计收集资料。

带状地形测量 先在沿线建立平面控制、高程控制，再沿选定线路测绘一定宽度的带状地形图，并在图上进行纸上定线。带状地形图的测图比例尺一般为1∶5000或1∶2000，地形复杂地段也可为1∶1000。

中线测设 按已批准的初步设计所选定的线路方案在实地确定位置，测设整数桩、加桩、控制桩和曲线主点桩的测量工作。内容包括：丈量线路的直线长度，详细测设曲线，按规定要求设置中线桩。中线桩不仅表示线路中线在地面上的位置和离开线路起点的里程，而且是测绘线路纵、横断面图的依据。

纵横断面测量 测量线路中线和中线垂直方向地面起伏的测量工作，一般包括纵断面测量和横断面测量。①纵断面测量。测量线路中线桩地面高程，并绘制纵断面图表现眼线地形起伏情况，供线路设计坡度用。具体施测方法与一般水准测量相同。为了显示地势变化，纵断面图的高程比例尺通常比水平距离比例尺大10或20倍。绘图时以距离为横坐标，高程为纵坐标，按规定的比例尺将外业所测各点展在绘图纸上，依次连接各点即为沿线路中线的地面线。②横断面测量。测量垂直于线路中线方向的地面起伏的工作。测量时以中线桩为准，在与线路中线的垂直方向上分别测量两侧各变坡点至中线桩的水平距离和高程差，并根据测得的数值绘制横断面图。横断面图主要用于设计线路横断面的形状、计算土石方量、放样边坡和布置各种构筑物。横断面图的距离与高程比例尺相同，一般为1∶100或1∶200。

参考书目

李青岳、陈永奇．工程测量学．北京：测绘出版社，1995.

Xiang-Zi-Yuan-Li shuidian guihua

湘资沅澧水电规划

（hydropower development planning of Xiang, Zi, Yuan and Li rivers） 湘江、资水、沅江、澧水都是注入洞庭湖的河流，然后汇入长江。根据《湘江干流规划报告》《湘江流域防洪规划报告》，湘江干流布置有9级水电站，其支流耒水上布置有11级水电站。根据《资水流域规划报告》，资水干流布置有13级水电站。根据《沅水河流规划报告》，沅江干流及源流清水江上布置有14级水电站，其支流酉水上布置有9级水电站。根据《澧水流域防洪规划报告》《澧水流域规划报告》澧水干流布置有18级水电站，其支流溇水上有5级水电站，在另一支流渫水上有7级水电站。4条水系内大型水电站有东江、柘溪、三板溪、白市、托口、洪江、凤滩、碗米坡、五强溪、凌津滩、江坪河和江垭等。

湘江规划 湘江发源于广西灵桂县海洋山，干流主要流经湖南省，全长856km，流域面积94 660km^2，在湘潭站多年平均流量为2083m^3/s。支流耒水在湖南省衡阳市下游5km处注入湘江。

湘江的首要开发任务是发展航运，远景规划考虑开发湘桂运河。湘桂运河将使湘江和珠江的支流桂江互相沟通通航；航运之后的开发任务是发电，湘江水能资源距用电中心较近，如供电给长三沙、湘潭、株洲和衡阳等；此外还承担有防洪和灌溉任务。为减少淹没损失，干流规划9级开发，在上游建一座调节性能好的太洲水电站，下接潇湘、浯溪、归阳、近尾洲、土谷塘、大源渡、株洲、长沙8座低水头水电站，总装机规模784MW，多年平均年发电量为35.816亿kW·h。已建成太洲、潇湘、浯溪、近尾洲、大源渡、株洲等6座水电站，装机规模543MW。

耒水是湘江干支流中水能资源最丰富、开发条件最好的河流，开发任务以发电为主。规划布置东江、小东江、鲤鱼江、石面坦、程江口、永兴一级、永兴二级、上堡、耒中、遥田、白渔潭等11座水电站，总装机规模803.4MW，多年平均年发电量24.255亿kW·h。东江以下水电站均已建成，其中东江水电站装机容量500MW，有一座多年调节水库，可为华中电力系统的水电站群进行补偿调节。

资水规划 资水有两源，西源发源于湖南省城步县黄马界，称赧水，为主源；南源发源于广西壮族自治区资源县越城岭北麓，称夫夷水。两源在双江口汇合后称资水，于湖南省益阳市甘溪港注入洞庭湖。资水流域面积28 038km^2，其中湖南占95.4%，全长653km，双江口以下464km，在桃江站多年平均流量741m^3/s。资水开发任务以发电为主，兼顾防洪、灌溉、航运等，柘溪以上河段以灌溉为主，结合发电、航运等。由于水库淹没等因素，除已建的柘溪水电站外，资水干流采取中低水头梯级布置。双江口以下共规划13座梯级水电站，即孔雀滩、神滩渡、晒谷滩、筱溪、浪石滩、柘溪、东坪、株溪口、金塘冲、马迹塘、白竹洲、修山和史家洲，其中柘溪水电站水库具有年调节能力，是资水干流骨干工程。此外，在夫夷水规划建犬木塘水电站。上述14座水电站总装机规模1832.75MW，多年平均年发电量

61.12 亿 kW·h。除金塘冲、史家洲和犬木塘 3 级外，其他 11 座电站均已建成，已建电站总装机规模 1527.75MW，占规划容量的 83.36%。

沅江规划　沅江有南、北两源，南源龙头江发源于贵州省都匀县的云雾山；北源重安江发源于贵州省麻江县平越山。两源汇合后称清水江，东流至黔城与渠水汇合后始称沅江，于湖南省常德德山注入洞庭湖。沅江较大的支流有渠水、㵲水、巫水、溆水、辰水、武水和酉水。水能资源比较丰富且开发条件较好的是沅江干流和支流酉水。沅江流域面积 90 000km²，干流全长 1028km，总落差 1033m，在桃源水电站处（流域面积 86 700km²）的多年平均流量为 2054m³/s。酉水流域面积 18 530km²。

沅江干流的开发以发电为主，兼顾防洪、航运。沅江是洞庭湖 4 水（湘江、资水、沅江、澧水）中水能资源最丰富，占 4 水总量的 46%。对于煤炭资源较缺的湖南省，开发沅江十分重要。防洪对象主要是沅江尾闾，主要依靠设置分洪区减少洪灾。改善沅江航道的措施是由水电站水库淹没浅滩、水库调节流量增加水深并配合航道整治措施。据上述任务在沅江干流规划布置革东、三板溪、挂治、白市、托口、洪江、安江、铜湾、清水塘、大洑潭、渔潭、五强溪、凌津滩、桃源共 14 级水电站，总装机规模 5113MW，多年平均年发电量 179.23 亿 kW·h。其中三板溪为沅水干流的“龙头”水库，具有多年调节性能，五强溪为沅水中下游的控制性骨干工程，为季调节水库。已建成三板溪、挂治、洪江、五强溪、凌津滩、铜湾、清水塘、大洑潭 8 座水电站，装机 3398MW。

酉水的开发任务主要是发电，兼顾其他。规划布置的梯级有湾塘、塘口、百福司（纳吉滩）、鸡笼滩、酉酬、石堤、碗米坡、凤滩、高滩等 9 级水电站，总装机规模 1460.5MW，多年平均年发电量 47.79 亿 kW·h。各梯级电站均已建成，其中凤滩水电站调节库容 10.6 亿 m³，具季调节能力。

澧水规划　澧水发源于湖南省桑植县，注入西洞庭湖，流域面积 18 583km²，在津市小渡口站多年平均流量为 523m³/s。澧水干流全长 390km，主要支流有溇水、渫水。

澧水的主要开发任务为防洪，兼顾灌溉、发电和航运。澧水是洞庭湖 4 水中洪旱渍涝灾害最多的河流。1935 年洪灾使 3 万余人死亡。1988 年出现的渍灾面积达 55 867hm²。澧水流域年年都有不同程度的旱灾，平均每年受灾面积约 4 万 hm²。开发利用澧水水能资源可促进山区各县实现电气化。规划在澧水干流布置了凉水口、山羊溪、贺龙、八斗溪、鱼潭、花岩、木龙滩、红壁岩、黄家铺、宜冲桥、岩泊渡、茶庵、城关、茶林河、三江口、青山、艳州、新街等 18 座水电站，总装机规模 740.45MW，多年平均年发电量 25.8734 亿 kW·h，正常蓄水位以下库容总共为 28.56 亿 m³，调节库容为 19.52 亿 m³，防洪库容为 6.46 亿 m³。其中宜冲桥是调节干流洪水的主要水库。

溇水为澧水一级支流，溇水干流按江坪河、淋溪河、江垭、关门岩、长潭河 5 级开发，总装机容量 1038.2MW，多年平均年发电量 24.48 亿 kW·h，总库容 32.9 亿 m³。其中，江垭、关门岩、长潭河 3 梯级为已建梯级，江坪河为在建梯级，淋溪河为拟建梯级。江坪河水电站具有多年调节性能，开发任务以发电为主，为溇水干流龙头梯级；江垭水电站是一个以防洪为主，兼有发电、灌溉、供水、航运等综合效益的水利枢纽工程，水库具有年调节能力；关门岩、长潭河两梯级均以发电为主，水库具有日调节性能。支流渫水布置小黄虎港、上泥市、张家渡、所街、寨坪、中军渡、皂市等 7 座水电站，总装机规模 39.2MW，多年平均年发电量 9.1801 亿 kW·h。皂市水电站水库是控蓄洪水的主要承担者，小黄虎港水电站位于最上游，是适应用电要求调节径流的骨干工程。实施以上规划将使澧水尾闾的防洪标准提高到 20 年一遇。

澧水干流和支流溇水已建 14 座水电站，总装机规模 743.45MW，其中江垭水电站装机容量 300MW，为规模最大者，其余均为中小型水电站。

Xiangjiaba Shuidianzhan

向家坝水电站　(Xiangjiaba Hydropower Station)

位于中国四川省宜宾县和云南省水富县交界处，距宜宾市 33km，离水富县城 1.5km，是中国金沙江下游河段规划的最末一个梯级水电站。电站以发电为主，同时可改善航运条件，兼顾防洪、灌溉，并具有拦沙和对溪洛渡水电站进行反调节等作用，见图 1。电站主要供电华中、华东地区，兼顾四川、云南两省用电需要。装机容量 6000MW，多年平均年发电量 308.80 亿 kW·h，灌溉面积 375.48 万亩。



图 1　向家坝水电站

水文和水库特性　坝址控制流域面积 458 800km²，多年平均流量 4570m³/s，多年平均年径流量 1440 亿 m³。500 年一遇设计洪水流量 41 200m³/s，5000 年一遇校核洪水流量 49 800m³/s。正常蓄水位 380.00m，死水位 370.00m，水库总库容 51.63 亿 m³，调节库容 9.03 亿 m³，为季调节水库。

坝址地形和地质　坝址区无区域性断裂通过，坝区场地地震基本烈度为Ⅶ度。坝址区基岩主要为三叠系上统须家河组河湖沼泽相砂岩、泥岩与含煤地层，岩性岩相变化大，交错层理发育。坝址的主要结构面是立煤湾挠曲核部的岩层陡倾带、小型断层、层间挤压破碎带、节理、裂隙以及层面等。

枢纽布置　枢纽工程由大坝、泄水建筑物、引水发电系统、通航建筑物等组成，见图 2。

大坝　混凝土重力坝，最大坝高 162.00m，坝顶长度 896.26m。

泄水建筑物　位于河床中部靠右岸，由 12 个表孔和 10 个中孔组成，相间布置。表孔单孔尺寸为 8.0m×26.0m



图 2 向家坝水电站枢纽三维模型

（宽×高），堰顶高程 354.0m，出口对称收缩，收缩段长 20m，边表孔外墙不收缩，12 个表孔设计泄量 25419m^3/s。中孔单孔尺寸为 6.0m×9.6m（宽×高），进口底坎高程 305.00m，10 个中孔设计泄量 20355m^3/s。采用带跌坎的底流消能，池长 228m，表中出口跌坎高程分别为 261.00m 和 253.00m。

引水发电系统　由右岸地下式厂房和左岸坝后式厂房组成。右岸引水发电系统由进水口、引水隧洞、地下厂房、母线洞、主变压器洞、尾水支洞和变顶高尾水隧洞等组成。引水洞采用单机单洞式。地下厂房尺寸为 255.0m×31m×85.5m（长×宽×高）。主变压器洞平行布置在主厂房下游侧，尺寸为 190.5m×26.0m×23m（长×宽×高）。尾水支洞断面为 16m×20.65m（宽×高），长度为 45.9～75.3m。变顶高尾水隧洞采用二机一洞布置方式，出口断面尺寸为 20m×34m（宽×高），长度为 263、199m。左岸坝后厂房位于泄流坝段左侧，厂房尺寸为 226.94m×39.5m×79.15m（长×宽×高），压力钢管直径 12.20m。

两岸厂房各安装 4 台单机额定容量为 750MW（单机最大容量 800MW）的水轮发电机组，全厂最大容量 6400MW。水轮机转轮直径 9.75/9.35m（左岸/右岸），额定转速 75/71.4r/min（左岸/右岸）；发电机为全空冷、半伞式、SF800 型，额定电压 20/23kV（左岸/右岸），额定功率因数 0.9。

通航建筑物　采用一级全平衡齿轮齿条爬升式垂直升船机，最大提升高度 114.20m。升船机布置于河道左侧，由上游引航道、上闸首（包括挡水坝段和渡槽段）、船厢室段、下闸首和下游引航道等五部分组成，全长约 1530m。升船机按Ⅳ级航道设计，同时兼顾 1000t 级单船过坝。最大过坝船队为 2×500t 级一顶二驳船队（111m×10.8m×1.6m，长×宽×吃水深）。

工程施工　采用两期导流，第一期围左岸，在非溢流坝及冲沙孔坝段内共留设 6 个 10m×14m（宽×高）的导流底孔及宽 115m 的缺口，由束窄后的右侧主河床泄流及通航；第二期围右岸。工程于 2006 年 11 月 26 日开工建设，2008 年 12 月下旬进行右侧主河床截流，2012 年 10 月首台机组发电。

主要工程量：土石方明挖 3959 万 m^3，石方洞挖 217 万 m^3，混凝土浇筑 1369 万 m^3，钢筋钢材 28.46 万 t，帷幕灌浆 43.11 万 m，固结灌浆 67.55 万 m。

设计单位　中国水电顾问集团中南勘测设计研究院。

建设单位　中国长江三峡集团公司。

xiangmu jingji fengxian fenxi

项目经济风险分析　(project economic risk analysis)

通过对项目经济风险因素的识别，采用定性或定量分析方法估计各风险因素发生的可能性及对项目财务和经济效益的影响程度，揭示影响的关键风险因素，提出相应对策，为投资决策服务。水电建设项目经济风险主要来源于政策的变化、市场需求变化、技术可靠性、工程方案、融资方案、组织管理、环境与社会、电价等一个方面或几个方面的共同影响。水电建设项目风险分析包括风险分析程序和风险分析方法。

水电建设项目风险分析程序　包括风险识别、风险估计、风险评价和风险应对。

风险识别　风险分析的基础，运用系统论的观点对项目进行全面考察和综合分析，并对各种风险进行比较、分类，确定各风险因素间的独立性与相关性，判断其发生的可能性及对项目的影响程度，按其重要性进行排队，或赋予权重。水电建设项目的各种不确定因素，诸如固定资产投资、建设期、有效电量、电价等，这些因素的变动，均影响项目的预期效益。关键的问题是要针对评价项目的特点，拟定分析因素，确定项目可能面临的主要风险并分析对项目的影响程度。如水文资料基础差的项目，应分析入库径流量变化出现的概率对净现值期望值的影响；对于多年调节水库，应主要分析在计算期内与丰、平、枯时段出现的概率相应的蓄水时间及经营期有效电量的分布时序对净现值期望值的影响；对淹没损失大、移民数量大的工程，则主要应分析移民进度不能如期实现导致长期低水位运行对净现值期望值的影响等。

风险估计　在风险识别后，通过定量分析的方法测度风险发生的可能性以及对项目的影响程度，又称风险测定、测试、衡量和估算等。

风险评价　对水电项目经济风险进行综合分析，依据风险对水电项目经济效益的影响程度进行项目风险分级排序的过程。财务（经济）内部收益率大于等于基准收益率或净现值大于等于零的累计概率值越大风险越小，标准差越小风险越小，综合风险等级越低风险越小。

风险应对　根据水电建设项目风险评价的结果，研究规避、控制与防范风险的措施，为项目全过程的风险管理提供依据。

水电建设项目风险分析方法　常用专家调查法、概率树法、层次分析法、CIM 模型及蒙特卡罗模拟等。

专家调查法　通过发函、开会或其他形式向专家进行调查，对项目风险因素、风险发生的可能性及风险对项目的影响程度评定，将诸多专家的经验集中起来形成分析结论。因更具客观性，故应用较为广泛。

概率树法　假定风险变量之间相互独立，在构造概率树的基础上，将每个风险变量的各种状态取值组合计算，分别计算每种组合状态下的评价指标值及相应的概率，得到评价指标的概率分布，并统计出评价指标低于或高于基准值的累计概率，计算评价指标的期望值、方差、标准差和离散系数。绘制以评价指标为横轴、累计概率为纵轴的累计概率曲线。计算项目净现值的期望值和净现值大于或等于零的累计概率。

层次分析法　美国 T.L.Saaty 教授于 20 世纪 70 年代中

期提出的一种定性与定量相结合的决策分析方法，简称AHP（analysis hierarchy process）方法。在风险分析中它有正向分解和反向合成两种途径：正向分解是将风险因素逐层分解识别，直至最基本的风险因素；反向合成是两两比较同一层次风险因素的重要程度，列出该层风险因素的判断矩阵，判断矩阵的特征根就是该层次各个风险因素的权重，利用权重与同层次风险因素概率分布的组合，求得上一层风险的概率分布，直至求出总目标的概率分布。

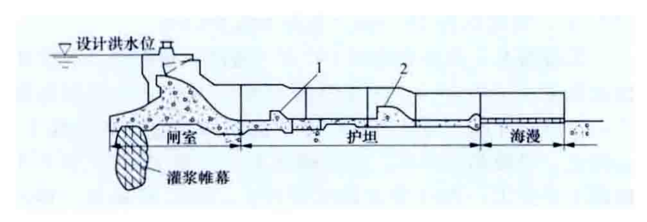
CIM 方法　控制区间和记忆模型（controlled interval and memory model），也称概率分布的叠加模型或记忆模型，由 C. 钱伯曼（C. Chapman）和 D. 库泊（D. Cooper）于 1983 年提出。CIM 模型包括串联响应模型和并联响应模型，它们分别是以随机变量的概率分布形式进行串联、并联叠加的有效方法。

蒙特卡罗模拟法　又称随机模拟法或统计试验法，是用随机抽样的方法抽取一组满足输入变量的概率分布特征的数值，输入这组变量计算项目评价指标，通过多次抽样计算可获得评价指标的概率分布及累计概率分布、期望值、方差、标准差，计算项目可行或不可行的概率，从而估计项目投资所承担的风险。

xiaolichi

消力池　（stilling basin）　设于泄水建筑物末端，对过坝急流利用底流水跃的消能工。又称水跃消能塘。在消力池内水流从急流突变为缓流，与下游河道水流衔接。适用于高、中、低水头，大、中、小流量的各类泄水建筑物，对尾水位变幅适应性较好，消能比较充分，有利于减轻对河床及岸边的冲刷。水头较高时护坦的前部承受较高的流速，容易发生空蚀及磨损，动水作用及脉动压力问题也较突出。

消力池布置　消力池上游端以反弧段与溢流坝面、闸室出口或陡槽连接，下游设防冲海漫。消力池底板高程可以与天然河床一致，如尾水深度不够，可开挖降低池底或在池尾设消力坎，以提高下游尾水深度；也可采用池、坎结合的消力池，保证在池内产生正常水跃。消力池布置见图。消力池长度和深度应能在各种可能的水流条件下形成水跃消能。为减小消力池长度，常采用辅助消能设施，如首部趾坎、前墩、尾坎等，但要注意防空蚀问题。



消力池布置图

1—首部趾坎；2—尾坎

底板结构　消力池底板均要设结构缝，缝内设止水片，底板下设排水管，防止高速水流钻到底板以下产生动水压力，掀动底板，尤其是消力池上游反弧末端出现收缩水深处，应特别注意防止动水压力和浮托力破坏底板。

运行要求　消力池在运行中要防止开启个别闸门，以避免下游尾水深度不够而出现远趋水跃，或闸门不对称开启时出现折冲水流，造成消力池底板和海漫的破坏。最好将所有闸孔均匀同步启闭，以防止消力池内出现不均匀水流和回流。这种不均匀水流将使池底板荷载复杂，而且容易将下游的石渣卷入消力池内，造成底板磨损和空蚀破坏。当闸孔很多时，为便于宣泄各种流量，可用隔墙将整个消力池分成若干消能区，进行分区消能和运行维护。

xiaolihu

消力戽　（roller bucket）　设于泄水建筑物末端下方，采用半径、挑角较大的反弧戽斗，射流水股以较大的曲率挑离戽斗形成较高涌浪的戽斗面流消能工。稳定戽流的典型流态为涌浪表面的前、后和底部共有 3 个横轴旋滚，即三滚一浪。

消力戽消能特点　消力戽的流态和下游尾水位关系密切，随着尾水位降低，稳定的戽流将逐步转变为临界戽流、挑流；随着尾水位升高，稳定的戽流可逐步变为淹没戽流和潜底戽流，流态变化见图 1。

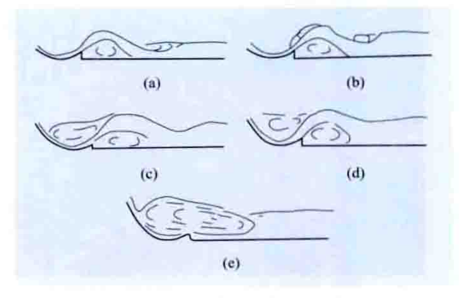


图 1　消力戽的流态变化

（a）挑流；（b）临界戽流；（c）稳定戽流；（d）淹没戽流；（e）潜底戽流

消力戽水流所形成的涌浪及表面高流速的波浪延续较长的距离，易引起岸边冲刷，同时底部旋滚易将石块卷进戽斗内而造成磨损，应加以防护。消力戽消能不如消力池充分，对下游河床的地质条件要求介于挑流鼻坎和消力池之间。水头不是很高的工程，当尾水位变化不大时，可研究采用此消能方式。建造消力戽比消力池简单，工程量较省。

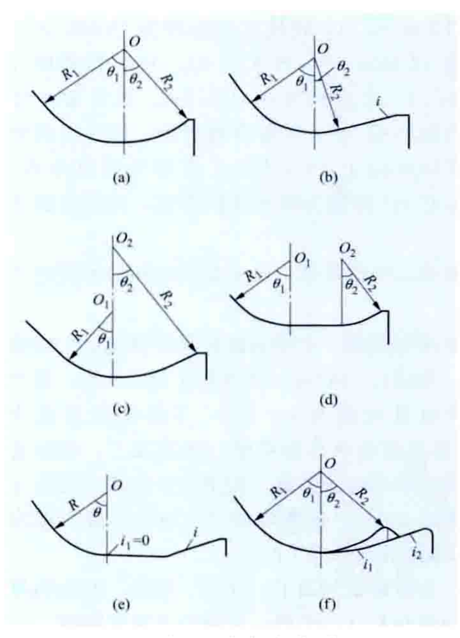


图 2　消力戽体型

（a）单圆弧；（b）单圆弧加直线挑坎；（c）双圆弧；（d）双圆弧加水平段；（e）单圆弧加折线挑坎；（f）单圆弧加差动坎

R、R_1、R_2—各圆弧段的半径；O、O_1、O_2—各圆弧的中心；θ、θ_1、θ_2—各圆弧段的圆弧角；i、i_1、i_2—各斜坡段的坡度

消力戽体型　根据不同的反弧半径、戽坎的挑角分 6 种，见图 2。

工程实例　已建工程中采用消力戽的有

中国的石泉、岩滩、沙溪口、乐滩等水电站，以及美国的大古力（Grand Coulee）水电站。

Xiaolangdi Shuili Shuniu

小浪底水利枢纽　（Xiaolangdi Hydroproject）　位于中国黄河干流河南省洛阳市以北 40km 处，在三门峡下游 130km。枢纽开发任务以防洪（包括防凌）、减淤为主，兼顾供水、灌溉和发电，蓄清排浑，除害兴利，综合利用，见图 1。装机容量 1800MW，多年平均年发电量在水库运用前 10 年为 46 亿 kW·h，后 10 年为 58.51 亿 kW·h。用 6 回 220kV 输电线路接入河南电网。



图 1　小浪底水电站

水文和水库特性　坝址以上流域面积为 69.4 万 km^2，占黄河流域面积的 92.3%。实测多年平均年径流量 423.2 亿 m^3，实测多年平均输沙量 13.51 亿 t。设计洪水标准为 1000 年一遇，相应洪水流量 40 000m^3/s，库水位 274m，控制最大下泄流量 13 490m^3/s；校核洪水标准为 10 000 年一遇，相应洪水流量 52 300m^3/s，库水位 275.0m，控制最大下泄流量 13 990m^3/s。水库死水位 230.0m，正常蓄水位 275.0m，总库容 126.5 亿 m^3。本着合理拦排、综合兴利的原则，规划水位 254m 以上 40.5 亿 m^3 库容为防洪库容，254m 以下有约 10 亿 m^3 库容为调水调沙库容，其余为淤沙库容。

枢纽布置　枢纽工程由大坝、泄水建筑物和引水发电系统组成，见图 2。

大坝　包括主坝和副坝。主坝为建在深厚覆盖层上的壤土斜心墙堆石坝，坝顶长 1667m，坝顶高程 281.00m，最大坝高 160m，上游边坡坡度为 1∶2.6，下游边坡坡度为 1∶1.75。坝基防渗采用混凝土防渗墙、帷幕为主，内铺盖连接水库淤积为辅的联合防渗方案。副坝位于左岸，为壤土心墙堆石坝，坝顶长 191m，坝顶高程 281.00m，最大坝高 47m，上、下游边坡坡度均为 1∶2.5。

泄水建筑物　以隧洞泄洪为主，泄洪、排沙、发电和灌溉建筑物均集中布置在左岸，共用一个组合式进水塔群。塔群由 10 座进水塔组成，总宽 280.00m，高 112.00m。泄水建筑物包括 3 条明流泄洪洞、3 条孔板消能泄洪洞、3 条排沙洞、1 座正常溢洪道和 1 座非常溢洪道。3 条明流洞断面均为城门洞形，尺寸分别为 10.5m×13m、10m×12m 和 10m×11.5m；每条洞长约 1100m；进口底槛高程分别为 195.00、209.00m 和 225.00m。3 条排沙洞的断面均为圆

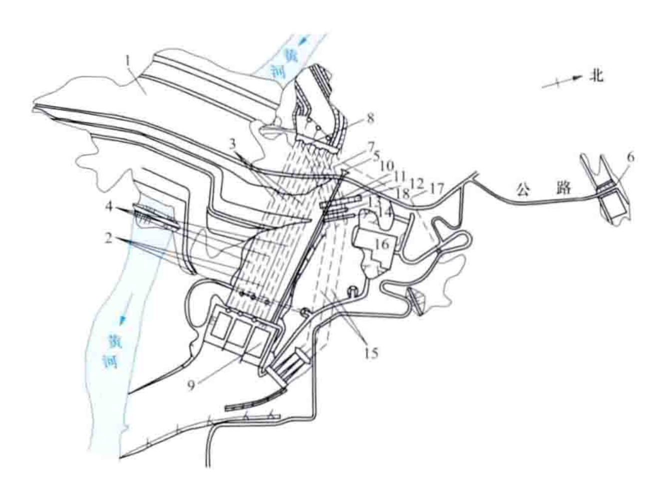


图 2　小浪底水利枢纽平面布置图

1—主坝；2—明流泄洪洞；3—孔板泄洪洞；4—排沙洞；5—正常溢洪道；6—非常溢洪道；7—发电引水隧洞；8—组合式进水塔群；9—消力塘及消力塘二级池；10—主厂房；11—安装场；12—副厂房；13—主变压器洞室；14—尾水闸门室；15—明流尾水洞；16—开关站；17—灌溉洞；18—副坝

形，直径 6.5m。孔板泄洪洞系由导流洞改建，圆形断面，直径 14.5m，采用三级孔板消能，进口底板高程均为 175.0m。正常溢洪道为陡槽式，进口高程 258.00m，泄槽宽 28m，当库水位为 275.00m 时，下泄流量为 3760m^3/s。非常溢洪道布置在左岸桐树岭以北，宽 100m，溢流底板高程 268.00m，底板以上建心墙堆石坝挡水，当库水位为 275.00m 时，泄流量为 3000m^3/s，泄洪时爆破坝体。6 条泄洪洞、3 条排沙洞和 1 座溢洪道采用两级消力塘集中消能。消力塘总宽 356m，长 210m，最大深度 28m。

引水发电系统　发电引水隧洞的进口位于组合式进水塔群上。由 6 条引水隧洞分别向 6 台水轮发电机组供水。引水隧洞洞长约 300m，洞径 7.8m，单洞最大引用流量 305m^3/s。每 2 台机组连接 1 条尾水洞，断面呈城门洞形，尺寸为 12m×18m。

主厂房为地下式，尺寸为 251m×26.2m×61.4m（长×宽×高）。厂房内安装 6 台单机容量为 300MW 的混流式水轮发电机组。水轮机转轮直径 6.3m，水轮机额定水头 112.0m，最大水头 140.0m，最小水头 90.0m。

工程施工　施工导流按 100 年一遇洪水标准设计，设计洪水流量 18 010m^3/s。采用分期导流，一期导流围右岸施工，原河床过流，同时进行左岸导流洞和其他建筑物施工。二期上、下游围堰挡水，主河槽施工。工程于 1991 年 9 月前期工程开工，1994 年主体工程开工，1997 年截流，1999 年 10 月下闸蓄水，1999 年底第一台机组发电，2001 年竣工。

主要工程量：土石方明挖 3837 万 m^3，石方洞挖 296 万 m^3，土石方填筑 6040 万 m^3，混凝土浇筑 312 万 m^3，金属结构安装 3.69 万 t，机电设备安装 3.09 万 t，帷幕灌浆 25.3 万 m，固结灌浆 27.5 万 m，回填灌浆 20.3 万 m^2。

设计单位　黄河水利委员会勘测规划设计院（现黄河勘测规划设计有限公司）。

建设单位　水利部小浪底水利枢纽建设管理局。

xiao liuyu sheji hongshui

小流域设计洪水 (design flood for small watershed) 在小流域内工程设计所采用的符合设计标准的洪水。各地区在小流域设计洪水计算时，对流域面积大小并没有严格的规定，有的以 $100km^2$ 以下作为小流域，也有用 $200km^2$ 以下作为小流域的。设计洪水计算的各种途径原则上都适用于小流域。小流域实测暴雨洪水资料一般较为短缺，常采用的设计洪水计算方法有地区经验公式法、推理公式法等。

地区经验公式法　经验公式包括计算参数（流域特征、暴雨特征等），经验性参数和经验性指数 3 个部分。经验性参数和指数需按经验公式形式，应用实测暴雨洪水资料来确定。参数和指数主要是反映流域的地质、地貌、植被覆盖等下垫面因素，因此可以分类进行综合分析，再移用于下垫面条件相似的无水文气象资料地区。

当地区上各种不同大小的流域面积都有较长期的实测流量资料时，可将各站的洪峰流量系列进行频率计算，然后直接用某频率的洪峰流量与流域特征值作相关分析，制订经验公式，移用于无资料地区。

公式的形式一般采用

$$Q_p = CA^n$$

式中 Q_p 为设计洪峰流量，m^3/s；A 为流域面积，km^2；C 和 n 为经验性参数和指数。

对于实测流量系列较短，暴雨资料相对较长的地区，可以用洪峰流量与最大 24h 暴雨量或某时段的最大净雨深和流域特征值建立相关关系。由已知设计暴雨或最大径流深推求相应设计频率的洪峰流量。有些地区建立洪峰流量的均值与暴雨、流域特征等的相关关系，求出洪峰流量均值，再用其他途径求出洪峰流量的离差系数 C_v 和偏差系数 C_s，据此计算出设计频率的洪峰流量。

经验公式的形式还可用于计算某时段设计洪量或其他洪水特征要素。

推理公式法　又称合理化法，是最早用作根据暴雨资料间接推求设计洪峰流量的方法之一。1851 年 T. J. 摩尔凡尼（T. J. Mulvaney）提出古典的推理公式。1956 年，中国林平一提出以推理公式为基础计算洪峰流量的方法。1962 年陈家琦等提出成因推理分析与经验相关分析相结合，从实测资料反求推理公式参数的方法，使推理公式法更加完善。从 1972 年起中国铁道部门和中国科学院地理研究所等陆续提出了计算造峰历时公式。中国水利水电工程一般采用水利水电科学研究院提出的计算方法，基本公式如下

$$Q_m = 0.278 \frac{h_\tau}{\tau} A \quad (1)$$

$$\tau = 0.278 \frac{L}{m J^{1/3} Q_m^{1/4}} \quad (2)$$

式中 Q_m 为洪峰流量，m^3/s；h_τ 在全面汇流时为相应于 τ 时段的最大净雨，在部分汇流时为单一洪峰的净雨，mm；τ 为汇流历时，h；A 为流域面积，km^2；L 为出口断面至分水岭的最长距离，km；m 为汇流参数；J 为沿 L 的平均比降，以小数计。

参考书目

陈家琦，张恭肃．小流域暴雨洪水计算．北京：水利电力出版社，1985.

xiaoshuidian

小水电 (small hydro) 装机容量较小的水电站或水力发电装置。一般按装机容量大小可把小水电划分为微型（micro）、小小型（mini）和小型（small）3 档。有的国家只有一个档次，有的国家则分为两个档次，差异较大。国际上还没有统一的标准，通常认为 10MW 以下是小水电。中国将装机容量小于 50MW 的水电站定义为小水电。小水电较多的国家和主要国际组织在 20 世纪 80 年代曾先后提出小水电的界定标准，见表 1。

表 1　部分国家和国际组织对小水电的界定和分类标准

国家或国际组织	微型水电容量范围或上限（kW）	小小型水电容量范围或上限（kW）	小型水电容量范围或上限（kW）	备注
联合国工业发展组织（United Nations Industrial Development Organization，UNIDO）	100	100～1000	1000～10 000	1980 年联合国
新能源与可再生能源大会	1000		1000～10 000	1981 年
拉丁美洲能源组织（Latin American Integration Association，OLADE）	50	50～500	500～5000	
中　国	100	100～500	500～50 000	
印　度	100	1000	1000～15 000	
马来西亚		25～500	5000	
尼泊尔、菲律宾			10 000	
泰　国	200	200～6000	6000～15 000	
日　本			10 000	
加拿大	50	2000	10 000	
法　国		1000	10 000	
瑞　典		100	15 000	
美　国			20 000	
新西兰		10 000	50 000	

特点　包括：①对生态环境影响较小；②淹没土地少，移民问题小，且容易解决；③多数情况可用当地建筑材料，从而降低建设费用；④设备易于标准化，有利于降低造价，缩短建设工期；⑤一般距负荷近，电能损耗小，见图 1；⑥多数无调节性能好的水库，发电能力有明显的季节性，年际间所能提供的电能也不均衡，适应负荷的能力差。

简史　最早的一批小水电站修建于 19 世纪晚期至 20 世纪初。例如，美国第一座小水电站——威斯康星州（Wisconsin）福克斯（Fox）河上的装机容量为 10.5kW 的小水电站建于 1882 年；南半球第一座小水电站——新西兰里夫顿（Refton）的容量为 20kW 的小水电站建于 1888 年；中国境内最早出现的小水电站是日本帝国主义侵占台湾省时

期，于1905年在新店溪支流上修建的龟山水电站；中国大陆的第一座小水电站是云南省石龙坝水电站的第一厂，装有2台单机容量为240kW的混流式水轮发电机组，1910年7月动工，1912年4月投产。



图1 小水电站（吉林省长白县双山五级发电站）

20世纪二三十年代后，大工业和大城市的用电负荷迅速增长，电力系统的规模不断扩大，小水电对电力系统的作用越来越小。当时大中型水电工程技术已日趋成熟，因而许多发达国家大规模修建大中型水电站，小水电不但发展很少，甚至停运拆除大批小水电站。20世纪中期，一些原来小水电比重很大的国家，其小水电比重迅速下降。如挪威，1944年小水电装机容量占全国水电站总装机容量的26.6%，到1979年小水电的比重只有4%了。

20世纪70年代后期，能源危机出现，多数发达国家水能资源已开发到一定程度。开发条件较好的大中型水电站站址几已开发殆尽，造价也增加，生态保护的要求对开发大中型水电站的制约又日益严重，因此，在80年代又重新出现世界范围兴建小水电的高潮。挪威在1979年查勘了300～1000kW的小水电站500座，其中包括不少以前停、拆的小水电站。美国对原为防洪、灌溉等非动力用途的50000座大坝进行了研究，发现其中有15000座可安装小水电，每座的可安装容量为1000～1500kW，总容量可达26600MW；此外改造一批小水电站，还可增加容量10800MW。

此时，许多发展中国家也制订了小水电发展计划，小水电建设在80年代大都有不同程度的发展。这一时期，中国的小水电建设进入了持续稳定发展阶段，每年新增装机容量700MW左右。

在推动小水电发展方面，联合国有关组织多次召开国际会议。第一次国际小水电会议是1979年在尼泊尔首都加德满都召开的，会议发表了《加德满都宣言》（关于国际合作决议）。1981年8月10～21日，在肯尼亚首都内罗毕召开的、有124个国家近4000人参加的联合国新能源与可再生能源大会上，小水电作为最现实、经济的可再生能源，受到了普遍重视。经联合国创议，由中国政府承办，在中国杭州建立了亚太地区小水电研究培训中心，以加强国际交流与合作。

1992年第15届世界能源大会（World Energy Congress, WEC）的题为《明日世界的能源》报告中指出："2020年以前，小水电在世界能源供应中的地位日益重要，主要是因为小水电对环境的负影响最小。今后小水电主要发展地区将在发展中国家。"1994年12月，联合国开发计划署、工业组织、教科文组织和中国水利部、对外经济贸易部以及七国集团、国际能源组织等22家机构和组织共同倡议，在中国杭州成立联合国国际小水电中心（见图2），旨在加强小水电的国际交流与合作，推动小水电的发展。



图2 联合国国际小水电中心

2008年的全世界小水电（装机容量小于10MW）装机容量53658MW，年发电量1900亿kW·h。欧洲开发程度较高，非洲的开发程度较低。见表2。

表2 2008年世界小水电（装机容量小于10MW）发展简况

洲别	小水电潜力（亿kW·h）	2008年底建成小水电	
		装机容量（MW）	年发电量（亿kW·h）
亚洲	11980	23752	824
非洲	1350	776	25
欧洲	1180	15931	540
南美洲	1110	2054	89
北美洲	2190	10869	410
大洋洲	70	277	11
总计	17870	53658	1900

世界小水电的发展趋势：①对过去认为开发不经济的站址重新进行估价评估，增加水能效益。②从承担更多综合利用要求的角度去研究开发小水电。③改进勘测设计与施工组织，降低小水电的造价。④广泛利用现有的水库和大坝，以及供水、输水系统中的水能资源修建小型水电站。⑤改造现有水电站，使其充分发挥效益，研究恢复条件较好、已关闭的小水电站。⑥500kW以上的骨干电站将逐年增加，100kW以下的微型电站将逐年减少。⑦统一机电设备标准，实现小水电站的自动化。

中国小水电的发展　根据中国《农村水能资源调查评价成果（2008）总报告》，单站装机容量大于等于0.1MW、小于等于50MW的小水电技术可开发量1.28亿kW，相应年发电量5350亿kW·h。中国小水电资源广泛分布在全国1600多个山区县，主要集中在西部地区。中国小水电技术可开发量中西部地区占62.1%，中部地区占16.2%，东部地区占21.7%。

1949年以前，中国仅有小水电站20余处，总装机容量

2000多kW。50年代，结合水利工程建设，建设了一批小水电站，共8975座，总装机容量255MW。

20世纪60年代，国家大电力系统发展较快并向部分农村延伸，因此这一时期小水电发展缓慢。1969年国务院在福建省永春县召开了全国小水电现场会议，总结推广永春县自力更生办小水电的经验，制定了"谁建、谁管、谁有"等政策和"治水办电相结合"的规划方针。充分调动了各地的积极性，形成了20世纪70年代全国小水电的大发展时期。到1979年，全国小水电总装机容量达到6300余MW。

1983年，国务院正式制定颁发了"积极发展小水电，建设中国式农村电气化试点县"的计划，并由水利电力部制定颁发了初级农村电气化县标准SD 178—1986《一百个农村电气化试点县初级阶段验收条例》，同时选定100个以建设小水电供电为主的初级农村电气化试点县。该项计划从1985年正式实施，1990年超额完成，共有109个县达到了预定标准。5年间，109个县的小水电装机容量由1406MW增加到2446MW。1990年起，从扶贫攻坚的政治高度加强了农村小水电电气化县的建设，到1995年第二批209个初级农村电气化县建成。"九五"计划期间，又部署建设了第三批300个农村初级电气化县。

到1997年底，中国小水电装机容量达到20520MW，年发电量683亿kW·h；2000年小水电装机容量达到24850MW，年发电量800亿kW·h；2005年小水电装机容量达到43090MW，年发电量1357亿kW·h。到2012年底，中国小水电装机容量达到了65686MW，年发电量达到2173亿kW·h。

Xiaowan Shuidianzhan

小湾水电站 (Xiaowan Hydropower Station) 位于中国云南省南涧县与凤庆县交界的澜沧江中游河段，工程开发任务以发电为主，兼有防洪、灌溉、旅游等综合利用效益。电站装机容量4200MW，多年平均年发电量190亿kW·h，以三回500kV输电线路接入南方电网。电站投产后，可使下游6个梯级电站得到补偿调节，增加保证出力约1100MW，增加年发电量25.75亿kW·h。

水库特性 500年一遇设计洪水流量16700m^3/s，相应库水位1238.30m，10000年一遇校核洪水流量23600m^3/s，相应库水位1242.51m，正常蓄水位1240.00m，死水位1166.00m，水库总库容150亿m^3，调节库容99亿m^3，具有多年调节性能。

地形地址和地质 枢纽区岩性主要为黑云花岗片麻岩和角闪斜长片麻岩，两种岩层均夹薄层透镜状片岩。坝址区地震基本烈度为Ⅷ度，100年超越概率2%的基岩水平地震动峰值加速度为0.313g。

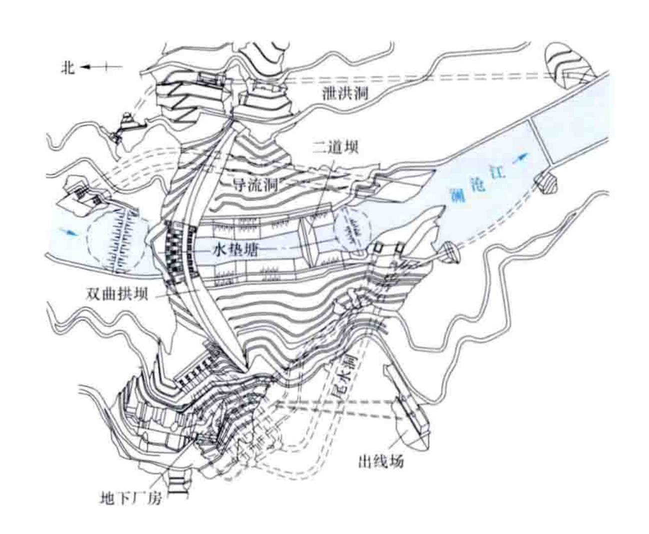
枢纽布置 枢纽工程由大坝、泄水建筑物、引水发电系统等组成，见图。

大坝 混凝土双曲拱坝，坝顶高程1245.00m，最大坝高294.5m，坝顶中心线弧长892.786m，中心线弦长798.50m，拱冠梁底宽73.124m，弧高比3.035，悬高比2.71，厚高比0.248，拱冠梁顶宽12m，承受最大水推力约1800万t。拱坝混凝土方量约842万m^3。

泄水建筑物 拱坝坝身设5孔泄洪表孔、6孔泄洪中孔和2孔放空底孔。表孔孔口尺寸11m×15m（宽×高），中孔孔口出口控制尺寸6m×6.5m（宽×高），放空底孔出口控制尺寸5m×7m（宽×高）。在设计洪水和校核洪水情况下，下泄流量分别为13568m^3/s和16889m^3/s。坝后水垫塘全长350m，采用复式梯形断面，底板高程965.00m，最小底宽70m，采用全断面钢筋混凝土衬护。二道坝为混凝土重力坝，坝高44m。



小湾水电站



小湾水电站枢纽平面布置图

左岸设一条泄洪洞，洞身为有压变无压"龙抬头"布置，洞轴线水平投影全长约1600m。有压段出口工作闸门控制孔口尺寸13m×13.5m（宽×高），在设计洪水和校核洪水标准下，下泄流量分别为3535m^3/s和3811m^3/s。

引水发电系统 布置在右岸，6条压力管道，单机单管供水，管径9.0m；地下主、副厂房，主变压器室和尾水调压室三大洞室采用平行布置。主、副厂房尺寸为298.4m×30.6m×79.38m（长×宽×高）；主变压器室布置于主厂房下游侧，距离主厂房下游边墙50m，最大尺寸为230.6m×19m×24.05m（长×宽×高）；尾水系统采用三机、三尾水支洞、一尾水调压室、一尾水洞的布置方式，圆筒式（直径32m）尾水调压室与主变压器室的水平间距为45m，圆形断面尾水洞，内径18m，长度分别为998.848m和789.710m。

厂房内安装6台单机容量700MW的竖轴混流式水轮发电机组，水轮机转轮直径6.6m，额定转速150r/min，额定水头216m，额定流量360.3m^3/s，额定出力714MW。发电机采用立轴伞式、三相，密闭自循环空冷，额定容量

777.8MW，额定电压18kV，额定功率因数0.9。发电机与主变压器采用单元接线，发电机出口装设发电机断路器，在6台发电机出口均引接机端变压器。变压器容量为260MV·A。经主变压器升压至500kV后，采用500kV高压电缆与GIS母线连接。

工程施工 采用土石围堰一次断流，隧洞和坝身导流底、中孔过流，全年导流方式。2002年1月20日开工建设，2004年10月25日截流，2008年12月下闸蓄水，2009年9月19日首台机组发电，2010年8月全部机组投产发电。

设计单位 中国水电顾问集团昆明勘测设计研究院。

建设单位 华能澜沧江水电有限公司。

xiejing kaiwa

斜井开挖

(inclined shaft excavation) 地下斜井开挖的施工作业。斜井开挖常应用于水电站通风井、出线井、排水井、压力管道、运输（交通）井以及为隧洞施工的斜支洞，一般用钻孔爆破法施工，有全断面开挖和导井法开挖两种方式。

全断面开挖 自上而下独头掘进，用风钻或凿岩台车分段钻孔分段爆破，斜井口设转车场，提升设施和风、水、照明管线等，采用声光通信联络，井内间隔一定距离设避炮洞，井侧有人行台阶和栏杆，工作面有防水和排水措施，爆破后的石渣用人力或耙斗装岩机装渣至箕斗，经卷扬机提升，通过井架转入斗车或梭式矿车出渣。对稳定性差的围岩要及时支护或边开挖边衬砌，适用于小断面斜井及倾角较小、围岩比较稳定的斜井。

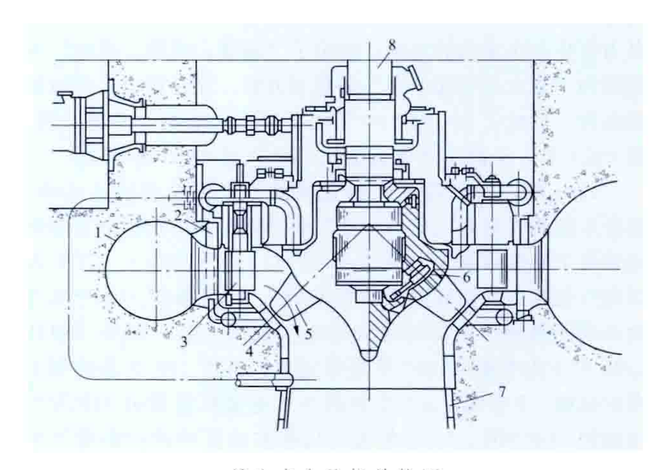
导井法开挖 断面面积大于18m² 的斜井，宜先开挖导井，再扩大到设计开挖断面。导井开挖断面宜为2.5m×5.5m。导井开挖方法有普通法、吊罐法、爬罐法及反井钻法4种。长度小于250m、倾角大于45°的斜井宜采用反井钻机开挖导井，也可采用爬罐开挖导井；长度大于250m时，宜采用爬罐开挖反导井。各种开挖方法与竖井开挖相似。由于斜井出渣较竖井困难，因此，在导井开挖后自上而下分段扩挖时，石渣用钢溜槽溜渣至井下通道出渣，必要时可在溜槽冲水润滑溜渣。对小型斜井，当围岩稳定性较好时，导井开挖后也可采用溜渣法蹬渣钻孔爆破，自下而上扩挖。采用反导井扩挖时，支护必须及时，爆破前最末道支护距工作面的距离一般不能太大。

xieliushi shuilunji

斜流式水轮机

(Deriaz turbine; diagonal turbine) 叶片的轴线与轴面水流进入转轮的方向均倾斜于水轮机主轴的反击式水轮机。又称德里亚水轮机、对角式水轮机。斜流式水轮机的使用水头范围为40～200m。

结构及特点 斜流式水轮机是在轴流式水轮机的基础上发展起来的，按其转轮叶片能否转动，又分为斜流转桨式和斜流定桨式。斜流式水轮机的主要部件有蜗壳、座环、转轮室、导水机构（含顶盖、底环、导叶等）、导叶调节装置、转轮（含叶片、转轮体、泄水锥等）、主轴（见水轮机主轴）、导轴承、轴密封、受油器、尾水管等。蜗壳一般为钢制，圆形断面。转轮体和转轮室均为球形。叶片的数目一般为8～12个。叶片轴线与水轮机主轴轴线的交角为45°～60°。叶片可以转动，其传动机构置于转轮体内。斜流式水轮机适应水头和负荷变化的能力较强，能在较宽的变化范围内保持高效率，但结构特别是叶片受力情况复杂，因而应用不广泛。其结构见图，图中同时标示出了水流流向。



斜流式水轮机结构图

1—蜗壳；2—座环；3—导水机构；4—转轮室；5—叶片；6—转轮体；7—尾水管；8—主轴

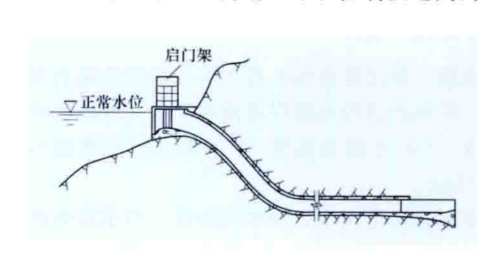
简史 斜流式水轮机是轴流转桨式水轮机向更高水头发展的产物，是20世纪50年代才发展起来的一种新机型，1951～1952年，由英国电力公司的瑞士人P. 德里亚（P. Deriaz）首次提出。单机输出功率最大的斜流式水轮机为苏联泽雅水电站（Зейская ГЭС）的水轮机，其转轮直径6m，使用水头74.5～97.3m，额定输出功率215MW；使用水头最高的是日本的高根（Takane）第一水电站，最大水头为136m。中国第一台斜流式水轮机安装于毛家村水电站（以礼河一级），单机额定输出功率8.33MW，转轮直径1.6m，运行水头范围27.5～77m。

xiehong suidong

泄洪隧洞

(spillway tunnel) 用于泄放洪水的水工隧洞。孔口位置可为表孔、中孔或深孔。根据布置和隧洞内水流特点，可分为无压、有压及混合型三种类型，建筑物由上游引水段、控制段、隧洞泄流段、消能工及下游退水渠组成，图示为表孔泄洪隧洞。

上游引水段 沟通水库和控制段之间的水道，其布置和体型应能使水流平顺地进入隧洞进口，防止进口流速分布不均或产生贯通的立轴漩涡，吸入空气，影响隧洞的过水能力和流态稳定。



表孔泄洪隧洞纵剖面示意图

控制段 泄洪隧洞控制泄量的关键部位，无压泄洪隧洞控制段设在隧洞进口，有压泄洪隧洞控制段设在隧洞出口，混合型泄洪隧洞控制段设在隧洞中部。控制段设有工作闸

门，工作闸门前为有压水流，工作闸门后为无压水流。为了获得最佳的压力分布和流量系数，闸门前应有一段喇叭口，工作闸门最好用弧形闸门，以防止空蚀破坏；工作闸门前设检修闸门，重要的工程宜在工作门前设事故闸门（或事故检修门）及检修闸门各一道。如采用平面闸门，门槽尺寸和形状应妥善设计，以免产生漩涡和空蚀。闸门附近的衬护应选用抗冲耐磨的材料。

隧洞泄流段　按不同的类型和水流特点，无压泄洪隧洞及混合型泄洪隧洞的无压段均要求平面布置成直线，以保证隧洞内为稳定的无压水流，防止出现不利的冲击波。有压泄洪隧洞和混合型泄洪隧洞的闸前有压段可以布置成曲线，但洞内流速和弯道曲率不宜太大。当河道地形适合时，多采用首部控制的直线无压泄洪隧洞。它具有泄流能力较大、水力学条件简单、隧洞衬护简化等优点。一般采用城门洞形的隧洞断面，采用混凝土衬护，表面力求平整，顶拱部分处于水面以上，当岩石较好时，也可采用简单的喷锚支护。当河道地形复杂，无法将泄洪隧洞的泄流段布置成直线时，可采用出口控制的有压或中部控制的混合型泄洪隧洞。有压泄洪隧洞过流段需要承受内水压力并需防渗，因此造价较高。为改善衬砌受力条件，最好采用圆形断面，为此在和闸门连接处要设渐变段。

消能工　泄洪隧洞常用挑流鼻坎消能，挑流鼻坎尽量高出下游最高水位。当挑流水舌方向与下游河道呈一定交角时，应调整挑流鼻坎体型使水舌顺河扩散，以减轻对下游河床及岸坡的冲刷。

下游退水渠　当下游采用底流消能时，则应有一段退水渠和河道相接，使水流顺利归槽。

xiehong zhamen

泄洪闸门

（flood discharge gate）　用以宣泄洪水并调节控制水库水位的工作闸门。需具有承受各种静、动荷载的能力，能在动水中启闭，并具备良好的结构和水力特性。经过泄洪闸门的水流流态直接影响闸门运行的可靠性，高速水流往往会使闸门及建筑物产生振动、空蚀、冲刷或加剧泥沙磨损等不良后果。因此，应十分重视泄洪闸门的结构动力特性和水流流态。

门型　泄洪闸门常用弧形闸门（简称弧门）或直升式平面闸门。闸门可布置在泄水建筑物的进口、中段或出口。弧门一般采用表面与混凝土面平齐的门槽，水头特别高时会采用突扩门槽，水力条件均较好，动水中操作时启闭力小，最适于用作泄洪闸门。直升式平面闸门水力特性比弧门差，但在布置上较紧凑，同时，闸门可提出门槽，便于检修。

水力条件　弧门在布置上由于没有门槽对水流的干扰，水力条件较好。高水头弧门采用突扩门槽时，突扩尺寸应综合考虑弧门启闭过程中的掺气、水翅等水力问题，可通过水工水力学模型试验验证确定。

直升式平面闸门门槽的水力条件较差，是产生空蚀的主要原因。应合理选择门槽体型，以防止空蚀破坏。闸门底缘形式对启闭力影响较大，部分利用水压闭门的闸门，上游底缘倾斜角应不小于45°，宜为60°，以避免底缘与水流出现分离现象；下游底缘倾角应不小于30°，当下游通气充分、流态良好时，可不计下吸力。

通气孔　在泄洪闸门后应设置通气孔，供补气或排气用，这是保证闸门正常工作，改善水流流态，防止空蚀、振动，减小闸门启闭力的重要措施之一。门后不设通气孔，或通气孔面积偏小、位置不当，都可能造成闸门启闭操作过程中的故障，影响安全运行，或加剧空蚀、振动等问题的发生。

振动　水工闸门为弹性结构，在动水及其他动力作用下，会使系统中任一构件的位移或应力产生随时间的往复变化，即闸门振动。一般情况下，闸门振动是轻微的，只有在某些特定条件下（如共振或自激振动）才较严重。可通过模型试验和原型观测，分析振源和振因，并采取相应的减振或防振措施。导致闸门振动的主要因素有：闸门某开度的水流条件不好、闸门结构的刚度不当、下游淹没水跃对闸门的冲击作用、水封漏水、闸门底缘形式不妥、通气孔面积不足及门顶门底同时过水等。

止水装置　平面闸门一般采用上游面止水，由于门叶结构承载后产生变位及制造安装偏差，易使潜孔式平面闸门上游面顶水封脱开而产生间歇性漏水，往往引起闸门振动，需采取防止措施。潜孔式平面闸门如采用下游面封水，虽可获得较好的封水效果，还可以利用门顶形成的水柱闭门，省去了压重，但闸门的启门力也会相应增大，故较少采用。

潜孔式弧形闸门的顶水封均位于上游面，因此，也会发生类似平面闸门上游面水封脱开的情况。为此，深孔弧门通常采用两道顶水封装置，其中一道用于全关时封水，另一道用于启闭过程封水。为适应高水头深孔弧门受载后产生的压缩变形，压紧式、充压式等新型水封结构已在行业内得到较广泛的运用。

xieshui jianzhuwu

泄水建筑物

（water release structure）　为宣泄洪水或其他需要放水而设置的水工建筑物，是水电枢纽工程的重要组成部分。其作用包括：①汛期泄放洪水，控制水库水位和下泄洪水流量，以保证挡水建筑物的安全和减轻下游洪水灾害。在非汛期有计划地放水，以满足下游通航、灌溉、工业和生活用水要求。②排沙冲沙，减轻水库淤积；降低进水口前淤沙高程，减少过机水流含沙量，以减轻对水轮机的磨损。这种泄水建筑物又称排沙建筑物。③在维修大坝或紧急情况下放水，降低库水位。④在多漂浮物河流或寒冷地区利用开敞式泄水建筑物排放漂浮物或冰凌。⑤孔口高程较低的泄水建筑物还可参与冲沙和施工后期导流，同时也可在水库下闸蓄水期间向下游供水。泄水建筑物的规模和泄水能力应满足上述各项要求，并按工程的规模和重要性确定在各种控制水位时的泄水标准。

泄水建筑物由控制段、泄流段及消能设施组成。当泄水建筑物设置在岸边时，根据地形条件，有时需设上游引水渠和下游退水渠（见图1）。控制段设有工作闸门和事故闸门或检修闸门，用以控制水流的泄放或截断水流。泄流段将过闸水流送至消能设施前。消能设施也称消能工，用以消耗泄流段尾端高速水流的能量，使下泄水流能安全地归入下游河道（或下游退水渠），减轻不利的河床冲刷和淤积。上游引水渠是水库和控制段之间的连接水道。下游退水渠是消能设施至下游河槽之间的连接水道。

混凝土坝枢纽常采用坝顶溢流与坝身泄水孔联合泄洪，

图 1　泄水建筑物示意图

狭谷地区高坝也可采用厂房顶溢流或厂前挑流，泄水流量大的特高混凝土坝多采用坝身表、中、深孔与泄洪隧洞联合泄洪的方式，地形、地质条件合适的也有采用岸边溢洪道或泄洪隧洞和坝身泄水孔联合泄洪的。土石坝枢纽一般优先采用岸边溢洪道、泄洪隧洞（可利用导流隧洞改建），小型和泄水流量较小的工程也有采用坝顶（身）泄洪的，如澳大利亚克罗蒂（Crotty）坝身溢洪道，中国新疆榆树沟、浙江桐柏混凝土面板堆石坝坝身溢洪道。

类型　根据位于枢纽中的位置和建筑物的特点分，有溢流坝、坝身泄水孔、泄水闸、滑雪道式溢洪道（见图 2）、岸边溢洪道、泄洪隧洞等。溢流坝、滑雪道式溢洪道、岸边溢洪道和设表孔的泄洪隧洞可统称溢洪道。滑雪道式溢洪道是岸边溢洪道的一种特殊布置，它布置在岸边，但较岸边溢洪道更靠近河岸，其首部控制段大多布置在岸边坝段上，泄流段和消能设施则顺坝下游面至岸边，结合岸边地形布置于高出地面的排架结构或实体混凝土之上，类似一个高台滑雪跳板，因而得名。这种溢洪道可以把挑流水舌送到距坝趾较远的下游河道中，对消能防冲有利。按泄水建筑物的孔口设置高程分，有表孔、中孔和深孔（或称底孔）泄水建筑物。表孔泄水建筑物的泄水孔口设于溢流坝堰顶，由闸门或闸门及胸墙挡水，主要用于泄放洪水，泄水能力较大，随水位升高，泄量增加多，即具有较大的超泄能力；中孔泄水建筑物和深孔泄水建筑物的泄水孔口分别设于水库水下中部和深部，它有利于降低库水位和排沙等，但超泄能力小。

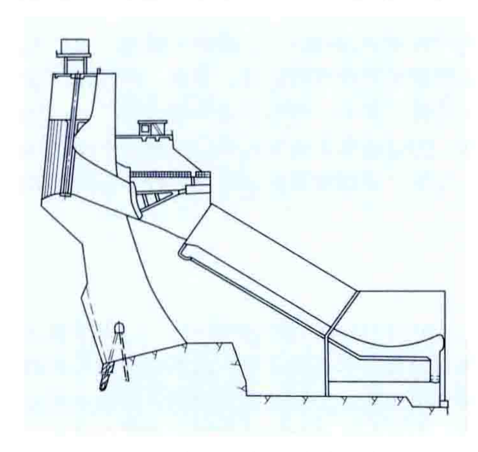


图 2　滑雪道式溢洪道示意图

为节省工程造价或受布置泄水建筑物的位置限制，有些工程利用合适的地形、地质条件设置非常溢洪道（开敞式，甚至为自溃式，如江西洪门），在超过设计洪水的情况下参与泄洪，其控制段以下结构可适当简化。

泄水建筑物的消能防冲　在泄水建筑物的尾端需设置消能设施，以消散部分或大部分水流的动能，使之在较短距离内与下游河道水流平顺衔接，从而减轻对下游河床及岸坡的冲刷，保证工程的安全。消能工布置多经水工模型试验验证后确定。消能的基本原理是依靠水股之间、水与固体边界之间和水与空气之间的相互撞击、掺混，以及水流内部的旋滚和紊动等作用来消除所含的动能，使水流从急流过渡到缓流。消能方式按水流条件可分为底流消能、面流消能和挑流消能三种，相应的建筑物为消力池、水垫塘、消力戽、宽尾墩联合消能工和面流坎、挑流鼻坎等，见图 3。

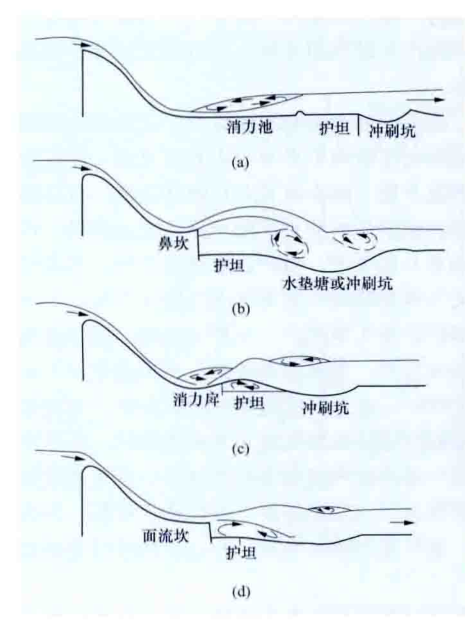


图 3　消能方式示意图
(a) 底流消能（消力池）；(b) 挑流消能（挑流鼻坎）；(c) 面流消能（消力戽）；(d) 面流消能（面流坎）

（1）底流消能。水流以底部急流方式进入消力池，遇足够深度的尾水顶托发生水跃消能（见水跃）。底流消能适应变幅较大的尾水位，广泛用于中低水头工程。对高水头、大单宽流量工程，因要求消力池尺寸很大，造价较高，故较少采用。

（2）面流消能。面流消能有两种形式：①在泄水建筑物尾端设置戽斗，使水流在戽斗内产生强迫旋滚，出戽水流形成一个涌浪并伴随一个底旋滚和一个下游表面旋滚而消能（见消力戽）；②在泄水建筑物尾端建垂直陡坎（面流坎），使高速水流保持在表面，利用其下部较长的底旋滚消能。后一种消能方式有利于下放漂木。这两种面流消能布置所产生的冲刷坑均距泄水建筑物有一定距离，有利于建筑物安全，但流速较高的面流和波浪延续的距离较长，易引起对下游岸坡的冲刷。对尾水位变幅要求严格、在高坝工程或尾水位变化较大时，因难以维持戽面流的流态，易于使坝趾附近的河床受到冲刷，均不宜采用。

（3）挑流消能。在泄水建筑物末端设挑流鼻坎，使水流向下游挑射，通过射流在空中的扩散、紊动和掺气作用，消除部分能量，然后跌落到离挑流鼻坎较远的河槽中，在冲刷坑和一定的尾水深度所形成的水垫中消能，见图 4。挑流消能充分利用了天然河床岩石的抗冲刷能力，是一种经济的消能方式，多用于高水头泄水建筑物。在地质条件较差（河床基岩不耐冲刷）或下游水垫深度不够时，可设二道坝（坎）或预挖水垫塘以增加水垫深度，减轻近坝冲刷。挑流消能将在下游造成溅水和雾化，因此，厂房和送变电设备应避开溅水和强雾化区，或采取防护措施。

把大型导流隧洞改建成高落差、大流量泄水建筑物时，采用孔板式、涡流式、竖井或斜井式等洞内消能工形式，见洞内消能工。对于中高水头、大单宽流量的溢流表孔，将闸



图 4　挑流消能

墩后段加宽或做成鱼尾状，即宽尾墩，再与其他消能工组合成联合消能工，见宽尾墩联合消能工。

泄水建筑物的防空蚀　为使泄水建筑物免受高速水流的空蚀破坏，采用的措施有：①优化泄水建筑物的过水面体型，力求光滑、平顺并与水流流线吻合，以免产生负压或局部漩涡等现象。合适的体型常通过水工水力学模型试验和已建工程类比确定。②控制泄水建筑物表面的施工不平整度，防止高速水流经过壁面时出现绕流和分离，形成负压而引起空蚀破坏。③采用抗空蚀性能较高的材料，常用的方法是提高混凝土强度等级，也可涂抹表面抗冲蚀材料等。④采用人工掺气措施，即向高速水流底部人工掺气。随着高水头泄水建筑物的兴建，对溢流表面平整度的要求也越来越严格，施工往往难以满足要求。根据工程实践和室内试验研究，在泄水建筑物上采取向水流底部掺气的措施可以避免或减轻空蚀破坏，临底水流掺气量达 3%～4%（气比水）时即可大大减弱空蚀破坏；当达到 7%～8%时，可以完全免除空蚀破坏。常用的掺气形式见图 5。

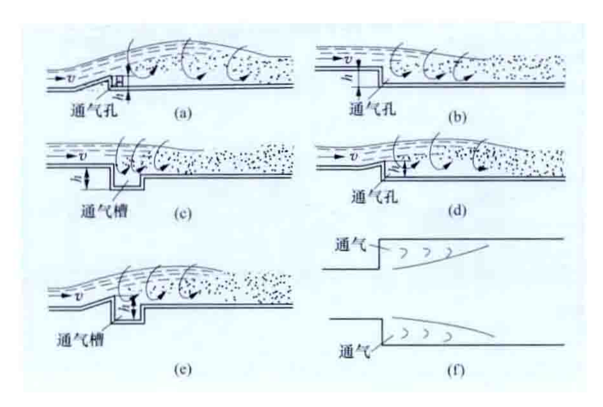


图 5　常用的掺气形式示意图

(a) 挑坎式；(b) 跌坎式；(c) 跌槽式；(d) 挑跌坎式；(e) 槽坎联合式；(f) 平面突扩式

在工程中最先采用掺气措施的是美国。美国垦务局于 20 世纪 40 年代开始研究，到 1960 年大古力坝泄水孔遭受空蚀破坏后初次应用通气槽掺气措施取得成功。采用这一技术措施可以适当降低对过水表面施工平整度的要求，同时也可避免使用专门的护面材料，经济效益好。

泄水建筑物的防磨损　在多沙河流上的泄水建筑物，经长期运用，将受到高速含沙水流的严重磨损。泥沙磨损分推移质磨损和悬移质磨损两类。推移质磨损多发生在山区河流，粒径大的砾石在水流中以滑动、滚动和跳动的方式运动，对泄水建筑物产生撞击和磨损破坏。悬移质磨损是指在高速水流的紊动作用下，小颗粒泥沙和水混合，形成挟沙水流，当通过建筑物时，造成表面磨损。防治的办法主要是提高材料的抗磨能力，如采用高强度混凝土。另外也有采用高强耐磨护面材料的，如钢板、水泥石英砂浆、环氧砂浆、铸石护面等，对于推移质磨损严重的部位，采用钢轨铸石组合材料护面效果较好。硅粉混凝土具有抗磨能力强、造价低、施工较简单的优点，已在工程中应用。

xieshui jianzhuwu weixiu

泄水建筑物维修　(maintenance of release structure)

为保证泄水建筑物的安全和正常运行而对其损坏部位进行维护、修复的工程措施。泄水建筑物包括溢流坝、溢洪道、泄洪隧洞、泄水孔、泄水闸等，一般由混凝土和水工金属结构等构成。

泄水建筑物在宣泄水流时，表面及下游受到高速水流及其挟带的泥沙、冰凌、漂浮物等作用，可能发生空蚀、磨蚀、冲刷等破坏，渗流及动水压力的作用也不容忽视。它还可能受到干湿、冷热、冻融、胀缩以及化学变化等风化因子的影响而造成损坏。对受到损坏的泄水建筑物，除按一般混凝土、水工金属结构维护所采用的方法进行处理和修复（见挡水建筑物维修和水工金属结构维修）外，还应针对泄水建筑物的特点及工程具体情况，采取日常维护和专项维修措施，消除可能造成破坏的潜在因素，强化其本身的防御能力，确保其本身以至整个水利枢纽的安全和正常运行。

日常维护　通过日常巡视和观测检查，发现问题应立即处理。检查时应特别注意泄水建筑物通过高速水流时有无振动、空蚀、冲刷等现象。日常维护内容有清扫、表面缺陷处理和设备润滑等。

专项维修措施　包括对空蚀、磨蚀、冲刷、渗流和动水压力等破坏的修复。

空蚀破坏的维修　泄水建筑物常因体形不合适或表面不平整而在高速水流作用下发生空蚀，从而导致混凝土表面的损坏。其处理措施主要是进行水工模型试验，选用抗空蚀性能好的砌护材料，保证过流表面的平整度，以及采取掺气减蚀措施等。

(1) 进行水工模型试验。对泄水建筑物过流部位维修的体型及结构形式进行适当修改，尽量采用流线型，避免表面的突变。对混凝土表面的突体要一一处理，予以铲除或研磨成具有一定斜度的坡面，达到平整度要求。水流边界越平顺，越不容易产生空穴和空蚀。提高出口边界附近的压强，也是避免空蚀的有效措施，如缩小有压流的出口断面，以提高孔洞内壁上的压强等。

(2) 选用抗空蚀性能好的材料砌护过流边界表面，以增强其自身的抗空蚀能力。水工混凝土的抗压强度与抗空蚀能力成正比，选用高标号混凝土可以提高抗空蚀能力。近代用钢纤维混凝土、聚合物砂浆或混凝土、硅粉混凝土等修复空蚀破坏区，效果很好。钢板是较好的抗空蚀材料，尤其是不锈钢板效果更好，也常用于砌护可能发生空蚀的区域。

(3) 掺气减蚀。掺气是防止空蚀的有效措施，在20世纪70年代以后已被广泛采用。泄槽内水深较小时，可以从表面得到自然掺气。不能满足自然掺气条件时，就要采用挑坎、跌坎、通气槽、侧向突扩、分流墩等工程设施，使水流与边界分离，形成空腔而吸入空气，达到掺气减蚀的目的。

磨蚀破坏的维修　泄水建筑物的过流表面受到挟带悬移质泥沙或推移质泥沙的水流以及漂浮物的撞击和磨损，会使混凝土表面变得粗糙不平整，露出粗骨料，乃至使钢筋折断，造成整个结构的严重破坏。需从减少磨蚀介质的来源、改善水流流态及采用防护措施等方面进行处理，以确保安全。

(1) 减少磨蚀介质的来源。如清除施工时遗留的渣料，对明确的产砂地区采取水土保持措施，在进水口上游设置拦截漂浮物的设施等。

(2) 改善水流流态。避免回流带动砂石杂物反复旋滚而造成的磨损。

(3) 采取防护措施。对以悬移质泥沙为主的挟沙水流，可用高标号砂浆或混凝土进行修补；对高速挟沙水流，可用聚合物砂浆或混凝土做面层，以提高其抗冲耐磨能力。对大颗粒推移质泥沙造成的撞击磨蚀，可采用花岗石、条石、卵石等材料砌护，并用砂浆勾缝。在严重情况下，可用钢轨、铸铁板、辉绿岩铸石等材料砌护，有的工程采用钢轨中间镶铸石板或条石的方法砌护，将钢轨的抗撞击和铸石的耐磨结合起来，效果良好。

冲刷破坏的维修　高流速、大流量水流下泄时，水流能量集中，如消能防冲措施不完善或管理运用不当，均可造成过流面、消能工及下游河床、岸坡或坝趾的冲刷或淘刷破坏，有时可造成严重后果。必须改善水流条件，防止上游冲刷的危害性发展。

(1) 改善水流流态。通过水工模型试验，对泄水建筑物进口段、泄槽段及出口段的水流冲刷情况进行研究，并采取改进措施。如进口段引渠的行进流速要控制在允许范围以内，否则就要加以砌护，并防止对两岸岸坡的冲刷或回流淘刷。对泄槽段，要防止形成冲击坡和过大的横向比降，或水流漫过边墙而冲刷边墙基础。对出口段的消能防冲措施要研究改进，甚至改建，以减少冲刷潜势，并研究冲刷坑深度及范围、回流淘刷的可能性，为加强砌护提供依据。

(2) 防止下游冲刷的危害性发展。如冲坑太深后削弱基岩的抗力体作用，影响大坝或岸坡的稳定；回流淘刷岸坡坡脚、鼻坎基础，从而造成岸坡或鼻坎的失稳；消力池长度和深度不够而出现远驱式水跃，冲刷下游河床；水流直冲岸坡等。要做防冲齿墙、修建二道坝以提高尾水水深，对岸坡进行砌护，利用鼻坎使水流归槽，用导流墙隔流墩等设施导引水流以避免回流，在消力池下游设海漫、护坦和防冲槽等辅助防冲设施等。冲深部位可用水下不分散混凝土修补，严重时要在下游围堰的保护下修复。

渗流和动水压力破坏维修　要确定泄水建筑物地区的渗流场，并据以确定作用在建筑物底部及侧墙上的扬压力或静水压力，如影响到建筑物稳定性时，要作防渗或排水处理，以降低渗水压力。有时泄槽内的底板不平整，形成下游高出上游的错台现象，接缝中未设止水，底板下也没有可靠的排水系统，高速水流通过时受阻，流速水头转化为压力水头，作用在混凝土底板之下，可将整个底板掀翻，并使基岩受到冲刷破坏，这时要重浇底板，缝间设止水，底板下设有效的排水系统，解除形成动水压力的可能性。

xieshuizha

泄水闸

(sluice barrage; release sluice)　主要用闸门挡水的低水头泄水建筑物。由闸室和上、下游连接段组成，见图1。闸室是泄水闸的主体，设有闸门。上游连接段的主要作用是引导水流均匀进闸；下游连接段的主要作用是消能防冲，引导水流安全排入下游河道。

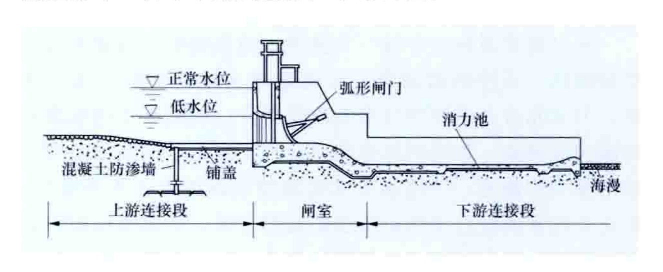


图1　泄水闸的组成

泄水闸按其结构布置分为开敞式（无胸墙、有胸墙）和涵洞式两种，见图2。涵洞式泄水闸一般建在堤坝之下，开敞式泄水闸本身即为挡水建筑物。泄水闸按其功用可分为节制闸、泄洪闸、排水闸、冲沙闸、挡潮闸等。

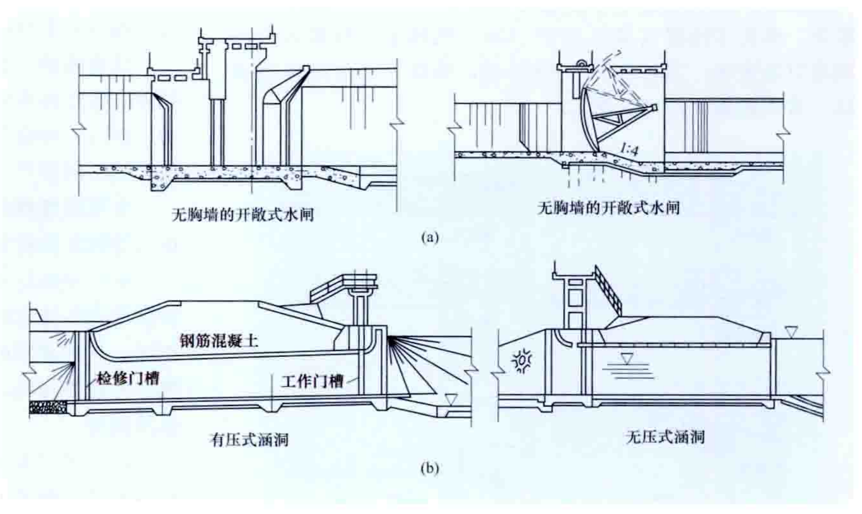


图2　开敞式和涵洞式闸室布置图
(a) 开敞式泄水闸；(b) 涵洞式泄水闸

泄水闸闸址　应根据水闸功能、特点和运用要求，综合考虑地形、地质、水流、潮汐等自然条件，以及施工、管理、环境等因素，经技术经济比较选定。应尽量布置在河道中泓线上。闸墩轮廓尺寸要符合流线，减少侧向收缩影响，以提高泄流能力。闸室一般用宽顶堰或低槛实用堰。开敞式泄水闸堰顶设闸门，闸门顶与上游正常库水位齐平，也可在闸门顶以上设一段短胸墙，以减小闸门尺寸。

闸室　为挡水建筑物，应力和稳定应满足要求。闸基应采取防渗和排水措施。软基上的闸室应注意满足地基的承载要求，必要时进行加固处理。闸室可以是在闸墩中分缝的整体结构，也可以是在闸底板分缝的分离式结构。分缝中应设止水。

消能工　闸室下游连接段设消力池和防冲海漫，应按设计标准选定消力池的形式和尺寸。

Xin'anjiang Shuidianzhan

新安江水电站　(Xin'anjiang Hydropower Station)

位于中国钱塘江支流新安江上，在浙江省建德县境内，由中国自己设计、施工，自制设备，自行安装的第一座大型水电工程，见图1。电站开发任务以发电为主，兼有防洪、航运、养殖、旅游等综合利用效益。原设计装机容量662.5MW，多年平均年发电量18.6亿kW·h，更新增容改造后总装机容量为850MW。以220kV和110kV高压输电线路各4回接入华东电力系统。



图1　新安江水电站

水文和水库特性　坝址以上流域面积10 480km²，多年平均年径流量112.5亿m³，多年平均流量357m³/s。工程按1000年一遇洪水设计，10 000年一遇洪水校核。设计洪水流量27 600m³/s，相应库水位111.00m。校核洪水流量41 280m³/s，相应库水位114.00m。水库正常蓄水位108.00m，汛期防洪限制水位106.50m，死水位86.00m。水库总库容216.26亿m³，调节库容102.7亿m³，死库容75.7亿m³，防洪库容47.3亿m³。为多年调节水库。

枢纽布置　枢纽工程由大坝、泄水建筑物、厂房等组成，见图2。

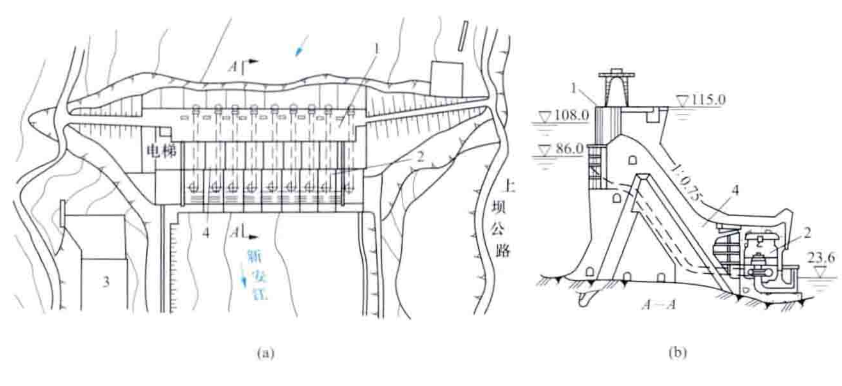


图2　新安江水电站枢纽平面布置及溢流坝剖面图

(a) 枢纽平面布置；(b) 溢流坝剖面图 (A—A)

1—大坝；2—厂房；3—高压开关站；4—溢洪道

大坝　混凝土宽缝重力坝，坝顶高程115m，最大坝高105m，坝顶长465.4m。

泄水建筑物　溢洪道位于拦河坝河床部分坝后厂房的顶部，设9个表孔，孔口宽13m、高10.5m。闸门为平面定轮闸门。堰顶高程99.00m，最大泄流量13 200m³/s。下泄的高速水流通过厂房顶部泄入河道。

厂房　坝后厂顶溢流式。厂房顶部与拦河坝连接，厂房下部与拦河坝用垂直缝分开，厂房全长216.1m。110kV和220kV开关站均布置在大坝下游右岸山坡上。厂房内安装9台竖轴混流式水轮发电机组，4台单机容量75MW，5台单机容量72.5MW。水轮机转轮直径均为4.1m，额定转速150r/min。发电机额定电压13.8kV，除9号机组为双水内冷式外，其余8台均为悬式空冷型。

工程施工　工程于1957年4月开工，1960年4月第一台机组发电，1978年最后一台机组投运。自1999年起对原有机组进行全面更新增容改造，至2008年全部9台机组更新改造完成。

主要工程量：土石方开挖586万m³，混凝土浇筑176万m³。混凝土最大日浇筑量达9000m³，最高月浇筑量14万m³。

综合利用　新安江水电站是华东电力系统主要调峰、调频和事故备用电源。

遭遇20年一遇到1000年一遇洪水情况下，经水库调节可以削减洪峰流量22%～28%，免除或减轻下游建德、桐庐、富阳等城镇和30万亩农田的洪水灾害。

水库上游形成110km的深水航道，轮船可由大坝直航安徽歙县。下游增加枯水期流量，航道得到改善，如坝址至梅城航段，建库前只能通小木船，现可行机动船。

广阔水域为发展水产养殖事业提供了良好的条件。库区小气候有所改善，极端最低温度提高，极端最高温度降低，无霜期从238天延长到263.2天，有利于马尾松、柑橘、桑树等的种植。

新安江水库形成的千岛湖成为驰名的旅游胜地。

设计单位　上海勘测设计研究院（现中国水电顾问集团华东勘测设计研究院）。

Xin Aodili Suidong Shigong Fa

新奥地利隧洞施工法　(new austrian tunnelling method, NATM)

在隧洞爆破掘进中为充分保护和发挥围岩的自承能力，借助现场量测围岩变形的反馈信息，适时用锚杆、喷混凝土等形成环状承载结构的隧洞施工技术，简称"新奥法"。其主要优点是：①维护围岩稳定、保证施工安全；②充分利用围岩的自身承载能力，降低了对支护结构的要求；③锚喷支护适应性强，施工速度快，有利于洞内各工序之间的平行流水作业；④根据现场量测预报，随时调整设计和施工方案；⑤与传统的隧洞设计施工方法相比，节约支护材料，降低工程造价。

工作原理　掌握最佳支护时机，在隧洞开挖后让围岩产生一定量的变形，但又不至发展到有害程度之时，就用喷混凝土等措施加以支护，使围岩形成一层环形柔性薄壁支护结构，如遇过大的围岩压力，

则增加锚杆加固，使围岩与支护紧密结合，构成一个整体的承载环。喷混凝土与围岩形成的承载环，在受剪力状态下工作，除能充分发挥围岩的承载潜力外，在与围岩同步变形的同时，还可形成一定反力提高围岩强度，有助于维护围岩稳定。新奥法的主要设计原理是：①以岩石力学为理论基础，充分考虑围岩在隧洞开挖时的空间和时间效应；②在设计上把支护与围岩作为整体看待，充分发挥围岩的自身承载能力，并以围岩起主导作用作为选择支护形式的依据；③在施工中尽量保持围岩原有强度。

新奥法的三大要素　喷混凝土、锚杆支护和现场量测称为新奥法的三大要素。在隧洞成型较好时，新奥法除能发挥喷混凝土和锚杆支护的优越性外，还能通过量测手段修改设计、施工和监测围岩应力状况。喷混凝土支护是新奥法最常用的手段，它既有一定刚度，可限制围岩变形的自由发展，又有一定柔性，能适应围岩一定量的变形。锚杆是在围岩压力过大时进行的二次加固支护。隧洞开挖后的最佳支护时机和是否需要二次支护，均需通过现场量测，观察围岩变位的收敛程度后决定。

发展概况　新奥法是1948年奥地利岩土力学家L. V. 拉布采维兹（L. V. Rabcewicz）提出的，1962年在萨尔茨堡（Salzburg）召开的第八届国际土力学会议上正式通过。1964年11月，L. V. 拉布采维兹发表第一篇关于新奥法的论文，但它的理论和实践总结还停留在不系统和片断资料状态，直到1975年才提出“新奥法”的综合介绍。当时这个命名还没有成为国际上通用的学术用语，如1978年10月在由法国隧洞技术协会召开的加固隧洞会议上称为“收敛约束法（convergence confinement method）”，1979年在美国亚特兰大（Atlanta）召开的隧洞快速掘进会议上称为“欧洲隧洞掘进法（Europe tunnelling method）”。直至20世纪80年代，新奥法的名称在国际上才逐渐统一，并在各国地下工程设计施工中得到迅速发展。新奥法于20世纪60年代在中国开始推广使用，80年代初通过在鲁布革水电站、广州抽水蓄能电站等应用后迅速发展。该技术在水利水电工程地下洞室设计、施工中广泛应用。

Xingaolaichuan Choushui Xuneng Dianzhan

新高濑川抽水蓄能电站

（Shin Takasegawa Pumped Storage Power Station）　位于日本本州岛中部高濑川上，在东京以西180km的岳山公园风景区内，装机容量1280MW，以400kV超高压输电线路接入东京电力系统。

枢纽布置　枢纽工程由上水库、下水库、水道系统、厂房等组成，见图。



新高濑川抽水蓄能电站枢纽平面布置图

上水库和下水库　在高濑川上兴建心墙土石坝形成上下水库，两水库距离约3km，共有落差230m。

上水库的高濑坝最大坝高176m，坝顶长362m，正常蓄水位1278.00m，相应库容7620万m^3；最低运行水位1268.00m，调节库容1620万m^3。上游坝坡坡度为1∶2.6，下游坝坡坡度为1∶1.5。2孔岸边溢洪道位于左岸，控制闸门尺寸为11.0m×11.3m（宽×高），设计泄量1400m^3/s。

下水库大坝为土石坝，最大坝高125m，坝顶长340m，最高蓄水位1049.00m，相应库容3250万m^3；最低运行水位1020.00m，调节库容1620万m^3。

水道系统　位于上水库右岸，设2个高9m、宽9.5m的喇叭形进水口。进水口由滑动闸门控制，设有固定型防涡流设施。2条引水隧洞为圆形断面，内径8m，长分别为2622m和2741m，间距40m。引水隧洞末端各设1个阻抗式调压井，高98m，内径15m，阻抗孔内径4m。2条隧洞末端分别以Y形岔管引出2条压力钢管。压力钢管长305～322m，内径由5.65m渐变至3.40m。厂房下游4条尾水隧洞为圆形断面，内径6.4m，长227～296m。出水口为喇叭形，共2孔，高8.5m，宽10.6m。

厂房　地下式厂房，主厂房长163m、宽27m、高54.5m，内装4台可逆式混流机组。主变压器洞位于厂房下游侧65m处，长108m、宽20m、高35.3m，安装有4台三相变压器。

4台立轴单级可逆式混流机组，额定容量320MW。水泵水轮机转轮直径6.4m。发电工况时，最大和最小水头分别为241m和202m，相应发电流量分别为155m^3/s和150m^3/s，相应最大和最小出力分别为336MW和230MW。抽水工况时，最大和最小扬程分别为264m和230m，相应抽水流量分别为100m^3/s和128m^3/s，相应最大和最小输入功率分别为297MW和200MW。发电电动机为立轴半伞式，额定容量为367MV·A，额定电压18kV，频率50Hz，转速214.3r/min。水泵起动方式：2号和4号机组采用辅助电动机，1号和3号机组采用背靠背方式。

工程施工　工程于1971年11月开工，1979年6月第一台机组并网发电，1981年竣工。

xinhao xitong

信号系统

（signal system）　反映水电站机电设备运行状态，对出现不正常工况或事故时显示和报警的系统。水电站所有设备状态、故障及事故信号，通过计算机监控系统采集、处理和存储，采用操作员工作站显示各种设备状态和状态变换情况，通过语音报警工作站显示各种报警信号并可以发出语音报警信息，同时采用事件顺序记录装置自动记录事故发生顺序，并用打印机打印制表，记录各类事故或不正常运行工况信息。

在中控室设置模拟屏的情况下，模拟屏上除显示主要电气设备的运行状态外，还设置故障和事故报警光字牌。模拟屏上的所有信号可以全部来自计算机监控系统，也可以直接取自生产过程设备或两者的结合。

设备状态信号　反映电站机电设备的运行状态，包括机组及附属设备的运行、停止状态，断路器、隔离开关等开关设备的分合位置，闸门、阀门的启闭状态，自动装置投切的运行状态等。设备状态信号采用不同颜色的信号灯、位置指示器或其他信号器具显示，通常在现地设置指示信号，同时上送电站计算机监控系统，以满足电站运行人员对电站机电设备的状态显示监视。

故障信号　设备故障情况下发出的显示和报警信号。故障是指设备运行异常，其危害尚未达到需要立即停机跳闸的程度，设备尚可维持继续运行，仅需通知运行人员前往检查处理。例如，设备运行过程中，超出系统正常条件以外的运行状况（电压、电流、功率、压力、液位、温度等超出正常范围的工况），或剪断销剪断、发电机过负荷、直流操作电源回路接地等。故障信号可在现地显示和报警，同时上送电站计算机监控系统。

事故信号　设备发生事故时发出的显示和报警信号。事故是指由于非计划发生的事件或元件缺陷，引起系统中的元件本身或其他相关设备的失效，致使断路器跳闸，机组灭磁、停机等，如电气保护动作、轴瓦温度过高、机组转速过高等。事故信号在现地显示和报警，并联动相关设备，同时上送计算机监控系统。

Xinggu Shuidianzhan

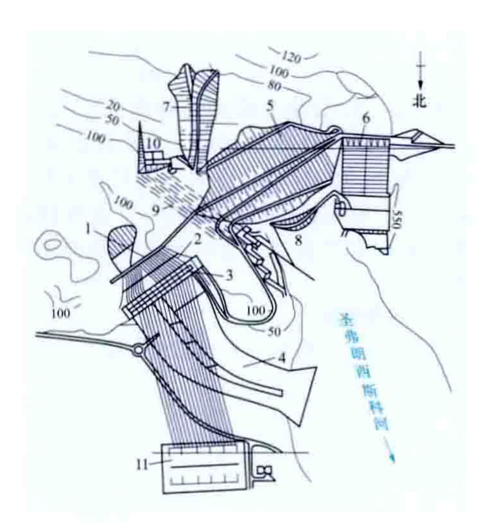
兴古水电站

（Xinco Hydropower Station）　位于巴西东北部地区圣弗朗西斯科河上，在已建保罗阿丰苏水电站下游60km处的阿拉格斯州与谢尔杰别州之间。初期装机容量3000MW，远期装机容量5000MW。

水文气象和水库特性　坝址以上流域面积60.87km²，多年平均流量2890m³/s，最大实测流量15000m³/s，年径流量909亿m³，总库容38亿m³。水库正常高水位138.00m，最高水位139.00m。该地区气候炎热，半干旱。年平均降雨量约700mm，蒸发量高，相对温度低。平均月降雨量变化在16.4mm（11月）至79.7mm（2月）之间，月平均温度幅度为22.5℃（7月）到27.2℃（2月）。

工程地质条件　坝址区基岩为变质花岗岩，典型的片状结构主要由黑母和闪岩构成。花岗岩多夹有长石斑晶，呈灰色，能见到数厘米大小的长石斑点。

枢纽布置　枢纽工程由大坝、泄水建筑物、厂房等组成，见图。



兴古水电站枢纽平面布置图

1—电站进水口；2—压力钢管；3—厂房；4—尾水渠；5—堆石坝；6—溢洪道；7—上游围堰；8—下游围堰；9—导流隧洞；10—导流隧洞进口；11—开关站

大坝　包括主坝和4座副坝。主坝为混凝土面板堆石坝，最大坝高151m，坝顶长850m，上下游平均坝坡坡度为1：1.4，堆石体方量为1260万m³。副坝最高为30m。

泄水建筑物　溢洪道位于左岸，设有2个泄洪陡槽，共计12个溢流表孔，采用弧形闸门控制，闸门宽14.83m、高20.76m，最大泄量为33000m³/s。

厂房　厂房为岸边半露天式厂房，布置在右岸。初期厂房长240m、高59m，进水口用重力式结构，引水压力管直径9.5m。机组分二期安装，第一期3000MW（6台，单机容量500MW），第二期2000MW（4台，单机容量500MW），机组额定出力535MW。500kV的开关站布置在尾水渠下游右岸。

工程施工　导流建筑物位于右岸，包括上游围堰，高50m，4条不衬砌导流隧洞，直径16m，洞长为520～848m，进水口为混凝土结构，其中一条洞装有4扇闸门，闸门尺寸为3.75m×5.6m，当库水位为123.00m时，泄量为1600m³/s。工程于1987年开工，1994年开始发电。

主要工程量：岩石开挖1390万m³，混凝土浇筑136万m³，主坝堆石1270万m³，围堰和副坝土石方380万m³。

设计单位　普洛蒙工程公司。

xingli kurong

兴利库容

（regulated storage capacity；utilizable storage capacity）　见死水位。

xunengbeng

蓄能泵

（storage pump）　将旋转机械能转变为水流能量的水力机械，特指在抽水蓄能电站中将水从下游提升至上游，达到蓄能目的的水泵。与水泵水轮机不同，蓄能泵仅作水泵运行，不作水轮机运行。

蓄能泵的水力设计理论和基本结构与普通水泵大致相同，但由于抽水蓄能电站对蓄能泵的水力性能和机械性能要求高，故其科技含量、材质和制造工艺均较普通水泵高，价格也较高。

与普通水泵相仿，构成蓄能泵的主要部件有吸水管、叶轮、叶轮前盖、叶轮后盖、蜗室、扩散管及主轴等。蓄能泵按主轴布置方式，分为立式和卧式两种；按叶轮形式，分为混流式（离心式）、轴流式、斜流式等；按叶轮的进水形式，分为单吸式或双吸式；按主轴上串联的叶轮个数，分为单级式和多级式两种。

蓄能泵与电动机一起组成蓄能泵组，在抽水蓄能电站中承担抽水任务，而发电任务则由另外设置的水轮机完成。多数情况下，蓄能泵与发电电动机、水轮机组成组合式抽水蓄能机组；也有将蓄能泵组和水轮发电机组分别设置的。典型的组合式抽水蓄能机组见图1、图2。在采用组合式抽水蓄能机组或分别设置蓄能泵组和水轮发电机组的情况下，由于蓄能泵和水轮机可以分别设计，两者均可在较高效率下运行，因此特别适用于抽水蓄能电站对抽水和发电有不同要求的场合，例如有些抽水蓄能电站发电取自一个水库，抽水则到另一个水库，当抽水扬程与发电水头相差悬殊时更能体现其优越性；或者应用于对抽水容量和发电容量要求不同的场合。

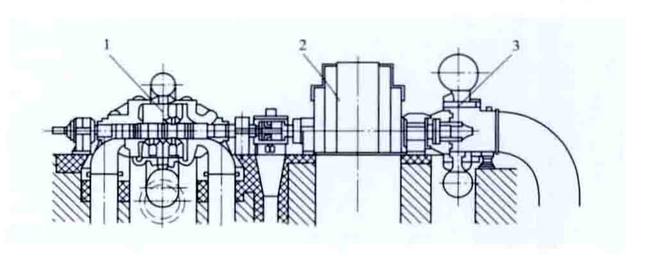


图1　卧式组合式抽水蓄能机组实例

1—双吸混流式蓄能泵；2—发电电动机；3—混流式水轮机

抽水蓄能电站发展初期，蓄能泵曾获得了较为广泛的应用，例如欧洲一些国家在20世纪30～50年代生产了很多分置式和组合式抽水蓄能机组，其中较为知名的是1959年安装在卢森堡的菲安登（Vianden）抽水蓄能电站的9台卧式组合式抽水蓄能机组，其发电额定水头290m，水轮机输出功率105MW，抽水扬程268m，蓄能泵输入功率71MW，机组转速428.6r/min。分置式和组合式抽水蓄能机组由于设备较多、投资大，在中、低水头的情况下被可逆式抽水蓄能机组所代替。在不适于采用可逆式水泵水轮机的新建抽水蓄能电站工程中，蓄能泵仍有应用，如中国西藏的羊卓雍湖抽水蓄能电站（见图3）采用了4台六级离心式蓄能泵和四喷嘴冲击式水轮机构成的立式组合式抽水蓄能机组，蓄能泵最大扬程859m，水轮机额定水头816m，额定功率23.1MW，机组转速750r/min，于1998年正式投产运行。

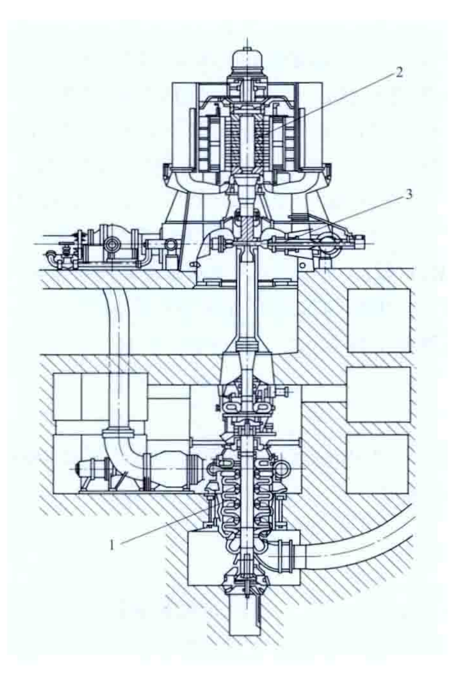


图2 立式组合式抽水蓄能机组实例
1—五级单吸混流式蓄能泵；2—发电电动机；3—四喷嘴冲击式水轮机


图3 西藏羊卓雍湖抽水蓄能电站

xuanshi shuilun fadianji

悬式水轮发电机 (suspended hydro-generator)

见立式水轮发电机。

xuanyizhi nisha

悬移质泥沙 (suspended load) 在水流中悬浮运动的泥沙。悬移质多为细沙和黏土颗粒，是河流输沙量的主要部分，常给水利水电工程带来一系列问题，如水库淤积、河道演变、引水渠首及渠系的淤积等。研究悬移质沿垂线分布问题的理论，有扩散理论和重力理论。

（1）扩散理论。泥沙能被悬浮并远距离输送，主要受水流的紊动扩散作用。由床面的剪切作用产生的紊动漩涡在向主流区上升时，能将含沙量较高的下层水流输送到含沙量较低的上层水流中。同时，泥沙由于重力作用而下沉，在两者共同作用下，泥沙以一定的分布形式在水流中悬浮，并能远距离输送。

（2）重力理论。为使悬移质泥沙在水流中不下沉，水流要付出一部分能量以保持泥沙悬浮，即水流要付出悬浮功。根据能量平衡原理，推导出悬移质含沙量沿水深分布规律。

悬移质含沙量沿垂线分布是不均匀的，通常接近床面处的含沙量最大，水面附近含沙量最小，其分布可用扩散理论导出的方程表示

$$\frac{S_y}{S_a}=\left(\frac{h-y}{y}\times\frac{a}{h-a}\right)^Z$$

$$Z=\frac{\omega}{ku_*}$$

式中 S_y、S_a 分别为距床面距离为 y 和 a 处的含沙量；h 为水深；Z 为悬浮指标；ω 为泥沙沉速；k 为卡门常数；u_* 为剪力速度。悬浮指标 Z 表征重力作用与紊动作用的关系。Z 越大表示泥沙越粗，重力作用越强，底层水体含沙量远大于表层，含沙量沿垂线分布越不均匀，反之亦然。

参考书目

钱宁，万兆惠．泥沙运动力学．北京：科学出版社，1983.



110～500kV dianli dianlan

110～500kV 电力电缆 (110～500kV power cable)

外包110～500kV相应电压等级绝缘，并包有金属外皮的绞导线。按其绝缘介质不同，分为自容式充油电力电缆和挤包绝缘电力电缆两大类。主要作为电站的高压引出线和输电回路。一般敷设于室内、沟道及隧道中，占地少，基本不占用地面上空间，安全隐蔽；受气候条件和周围环境影响小，电力传输性能稳定，可以较少维护。水电站一般地处深山峡谷，变压器高压侧引出线往往受地质、地形条件和枢纽布置的限制，因此多采用高压电力电缆。

自容式充油电力电缆　又称充油电力电缆或OF电力电缆，以油浸渍纸作为绝缘介质，采用薄型绝缘纸绕包后，用低黏度油在压力下填充于间隙中。OF电力电缆开发较早，价格较低，已取得较长期和成熟的制造、安装和维修运行经验，但需要设置一套供油装置，布置上略复杂；当敷设高差较大时，由于其下终端油压较大，易发生渗漏油现象，降低了可靠性，高差超过200m时制造难度和价格将大大增加；OF电力电缆的介电常数、介质损失角正切tanδ和损耗均远高于挤包绝缘电力电缆，运行费用较高；因质量和尺寸较大，护套机械强度较差，且允许弯曲半径大，故运输、储存、现场安装、运行维护等均较为复杂和困难；OF电力电缆本身属带油设备，因此对防火要求严格，需相应设置一套消防设施，敷设高差小时采用埋沙还较为简便，若对高差较大的地下厂房斜井或竖井布置则较为复杂，代价也较大。

挤包绝缘电力电缆　挤包绝缘电力电缆的绝缘介质主要为聚乙烯塑料，有交联聚乙烯（XLPE）和低密度聚乙烯（LDPE）两种。

XLPE和LDPE两种挤包绝缘电力电缆相对OF电力电缆有共同的特点：①质量小，截面小，电缆允许弯曲半径仅为OF电力电缆的3/5左右；②安装和布置简便，预制应力锥型电缆终端制作容易，施工工期短；③基本无须维护和监测，故障修复时间较短；④抗拉性能好，能适应较大的敷设高差；⑤由于聚乙烯是电绝缘性能最好的塑料，故绝缘性能较好；⑥介电常数、介质损失角正切tanδ和损耗均较低；⑦自身不带油，且具有良好的难燃（或阻燃）特性，消防设施较为简单。

XLPE和LDPE两种挤包绝缘电力电缆也各有其特点：XLPE电缆电流载荷、抵抗热变形特性和机械特性比LDPE电缆好，故XLPE电缆的允许温度较高，在同一额定电流下其导体截面一般比LDPE小；XLPE电缆绝缘介质的交联工艺复杂，制造过程中对介质纯度控制的难度较大、要求较为严格。而LDPE电缆绝缘介质的提纯工艺较简单、易控制，增加特殊添加剂后大大改善了绝缘性能；同时，LDPE电缆介质纯度较高，杂质含量较少、水分含量较低，故其介质损失角正切tanδ和损耗均比XLPE电缆低。

简史　自20世纪60年代起相当一段时期内，OF电力电缆一直是中国高压电缆的唯一产品。

500kV OF电力电缆的生产始于20世纪70年代初。英国于1967年投运第一回400kV OF电力电缆，第一回500kV OF电力电缆（高差约200m）于1975年在美国大古力水电站投运。日本于1973年在Okutataragi抽水蓄能电站安装第一回500kV OF电力电缆（高差约90m）。

日本对XLPE电缆的开发和研制较早，1971年提供世界上第一回110kV和154kV XLPE电缆，1977年提供第一回187kV XLPE电缆，1979年提供第一回275kV XLPE电缆，1987年生产第一回500kV XLPE电缆（高差60m），并于1988年在日本下乡抽水蓄能电站投运。

法国是唯一生产LDPE电缆的国家，其第一回225kV LDPE电缆于1962年投运，第一回400kV LDPE电缆于1985年投运。

中国1968年研制了南京下关横过长江的110kV OF电力电缆，1983年研制了500kV OF电力电缆，1976年开始研制XLPE电缆，现已能生产110～500kV XLPE电缆，并具备生产500kV XLPE电缆终端的能力。近20年来，XLPE电缆因其技术性能及价格等方面的优势，已成为中国高压、超高压电力电缆的主导品种。

从20世纪60年代中至70年代初，中国分别在以礼河、刘家峡、渔子溪一级、映秀湾、新安江、乌江渡等水电站采用了国产220kV和330kV OF电力电缆。80年代投产的龙羊峡水电站也采用了引进的330kV OF电力电缆。90年代以来投产的广州抽水蓄能电站一、二期工程均引进法国的500kV OF电力电缆（高差达200m）。

东风水电站和十三陵抽水蓄能电站分别引进高差为150m和160m的220kV XLPE电缆。天荒坪抽水蓄能电站引进日本500kV XLPE电缆（高差100m）。龙滩水电站首次采用中国设计制造的500kV XLPE电缆。

李家峡水电站引进法国330kV LDPE电缆，二滩水电站引进法国500kV LDPE电缆（高差180m）。

yali guandao

压力管道 (penstock)　从水库（压力前池或调压室）将水流在有压状态下输送给水轮机的管道。又称高压管道。其特点是坡度陡，内水压力大，并直接承受水击压力作用。压力管道的路线应尽量短而直，以节省投资，减小水头损失及水击压力，改善机组运行条件。

压力管道按布置方式分，有露天式、坝式和地下式三种。

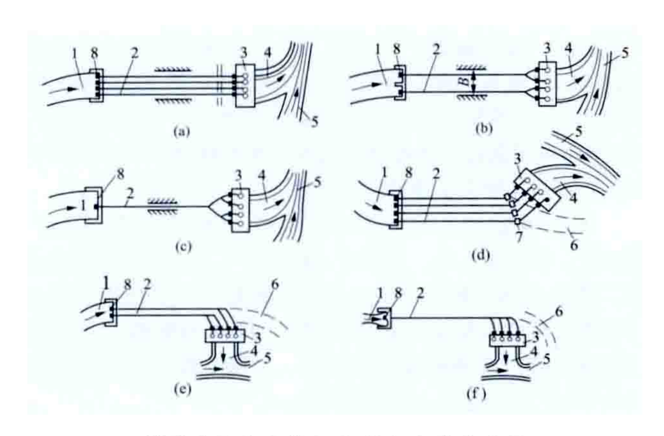
(1) 露天式。布置在地面，多用于从调压室或压力前池向地面厂房水轮机引水。多沿垂直等高线的山坡布置，避免布置在地表水集中的沟谷。布置要求同引水明管。

(2) 坝式。有坝内埋管、坝后背管、坝前引水管（见输

水建筑物）等类型，多用于混凝土坝坝后式、溢流式及坝内式厂房。

（3）地下式。布置在山体中，多用于从水库或调压室向发电厂房的水轮机引水。一般在隧洞中安装钢管，并在管外回填混凝土和回填灌浆，一般应进行固结灌浆和接触灌浆，其中固结灌浆应根据围岩地质情况、内外水压力、设计要求等经综合研究后确定。山体雄厚，围岩完整、坚硬，透水性小的地段可不衬钢板，只在靠近厂房的水平段设钢板衬砌。由于内水压力可由钢管和周围的岩体共同承担，因此钢管管壁可以较薄，如承担外水压力能力不够，需在钢管外壁设加劲环，以增加钢管抗外压稳定的能力，并考虑设置排水廊道或钢管外排水管等措施，降低外水压力。压力管道的布置形式有竖井和斜井两种。斜井的坡度取决于开挖方法，从上部出渣，坡度需较缓，一般不陡于35°；向下溜渣运出时，坡度要大于45°，施工中多采用后者。相邻管道和管道上覆岩体应有足够的厚度，以保持围岩的稳定。管线尽量与岩层及断裂构造的走向保持较大的夹角。

压力管道按供水方式分，有单独供水、分组供水和联合供水三种（见图）。管道进厂方向相对厂房纵轴分正向、斜向、纵向三种（见图），主要取决于地形、地质条件和各建筑物相对位置布置要求。



管道布置和向机组的供水方式示意图

（a）单独供水（正向布置）；（b）分组供水（正向布置）；（c）联合供水（正向布置）；（d）单独供水（斜向布置）；（e）分组供水（纵向布置）；（f）联合供水（纵向布置）

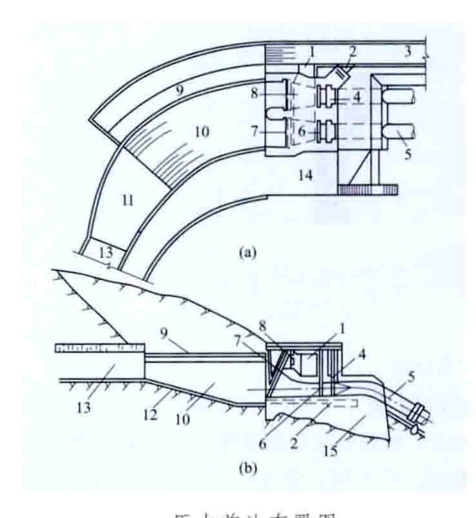
1—压力前池；2—压力管道；3—厂房；4—尾水渠；5—河流；6—排水渠；7—镇墩；8—阀门（闸门）；*B*—管沟开挖宽度

yali qianchi

压力前池 (forebay)

引水式水电站从无压引水过渡到压力管道之间的连接建筑物，具有为水轮机调节水量和水位、平稳水流的作用。它由连接段、池身和压力管道进水口组成，根据需要可设泄水、排污、排沙、排冰、放空等设施。某些建筑物可综合利用，如排污、排沙及排冰可共用一个陡槽。压力前池的布置见右图。压力前池的池身要有一定的容量，多利用有利地形，扩宽、加深形成。引水明渠与池身间设连接（扩散）段。压力管道进水口一般为承压墙式。压力前池位置的选择应特别注意地基稳定和渗漏条件。

压力前池的功能有：①调节水量。无压引水明渠水流经过压力前池均匀地分配到各压力管道。当机组出力增加时，从前池补充水量；当出力减小时，前池可容纳多余的水量。一般具有日调节功能。②平稳水流。当水电站减负荷时，流入压力管道的流量将急剧减少，利用压力前池的容积和溢流设施，能迅速削减涌浪，平稳水流。③设置闸门用以控制水流，保证事故关闭和检修。在压力管道进水口设检修闸门、工作闸门或事故闸门、通气孔和相应的启门设备。发生事故时，事故闸门可紧急关闭。通气孔向压力管道中补气，避免管道内形成真空。④排除污物、泥沙和冰凌。压力管道进水口设拦污栅及清污设备，以清除从渠道流来的漂浮物。同时可在压力管道进水口附近设排污道，排污道可用叠梁控制，以调整排污水位，在寒冷地区，排冰、排污道可结合使用。由于压力前池中流速低，具有一定的沉沙作用，沉沙可用排沙廊道排出。排沙廊道宜设置在压力管道进水口底坎下面，以利水流推动泥沙进入廊道。⑤保证电站下游用水。在电站停止运行时，为保证电站下游用水，需设置泄水道，如上图所示旁侧溢流堰，在堰后设置泄水陡槽。



压力前池布置图

（a）平面图；（b）剖面图

1—排冰、排污道；2—排沙道；3—陡槽；4—工作门槽；5—压力管道；6—检修门；7—拦污栅；8—排冰道叠梁槽；9—溢流堰；10—压力前池；11—连接段；12—池底；13—引水明渠；14—检修平台；15—镇墩

yali shangshenglü

压力上升率 (pressure rising ratio)

机组甩负荷过程中输水系统水流被导叶或针阀快速截断时所产生的水压升高最大值与初始压力之比的百分值，以ξ表示。由于水流流速瞬间变化引起的压力骤升、骤降现象称为水锤，是流道中流体惯性的反映。压力上升率是水电站水力过渡过程计算的重要内容，是电站输水系统、水轮机的重要设计依据之一。在其他条件不变的情况下，导叶或针阀的关闭时间越长，压力上升率越小。

压力上升率计算　大中型水电站的水力过渡过程计算均采用计算机仿真程序进行，预测不同甩负荷工况下输水系统的压力上升率。对于输水系统简单、机组容量不大的小型电站，也可采用解析法计算，可分为直接水锤和间接水锤两种情况进行计算。

（1）直接水锤。导叶关闭过程中，当水锤波沿引水管上行至上游水面再反射至导叶的反射时间t_r（$t_r=2L/a$）大于等于导叶的关闭时间t_s时产生，其值ΔH为

$$\Delta H=\pm a\Delta v/g$$

其中

$$\Delta v=v_0-v_m$$

压力上升率则为

$$\xi=(\Delta H/H_0)\times 100\%$$

式中 a 为水锤波传播速度，m/s；Δv 为引水管中流速变化差值，m/s；v_0、v_m 分别为导叶关闭前、关闭后引水管中的平均流速，m/s；g 为重力加速度，m/s^2；H_0 为机组甩负荷时的初始压力（水头），m。

（2）间接水锤。当水锤波反射时间 t_r 小于导叶的关闭时间 t_s 时，导叶前端将出现间接水锤。导叶为直线关闭规律时，第一相水锤压力上升率 ξ_1 为

$$\xi_1=\frac{2\sigma}{1+\rho\tau_0\mp\sigma}\times 100\%$$

其中 $$\sigma=\sum Lv/gH_0t_s$$

$$\rho=a\Delta v/2gH_0$$

末相水锤压力上升率 ξ_m 为

$$\xi_m=\frac{2\sigma}{2\mp\sigma}\times 100\%$$

式中 σ、ρ 为管道特性系数；τ_0 为导叶起始开度，%；$\sum Lv$ 为引水管、蜗壳及尾水管内的流速与其长度乘积的总和，m^2/s；g 为重力加速度，m/s^2；H_0、a、Δv 含义同式（1）和式（2）。

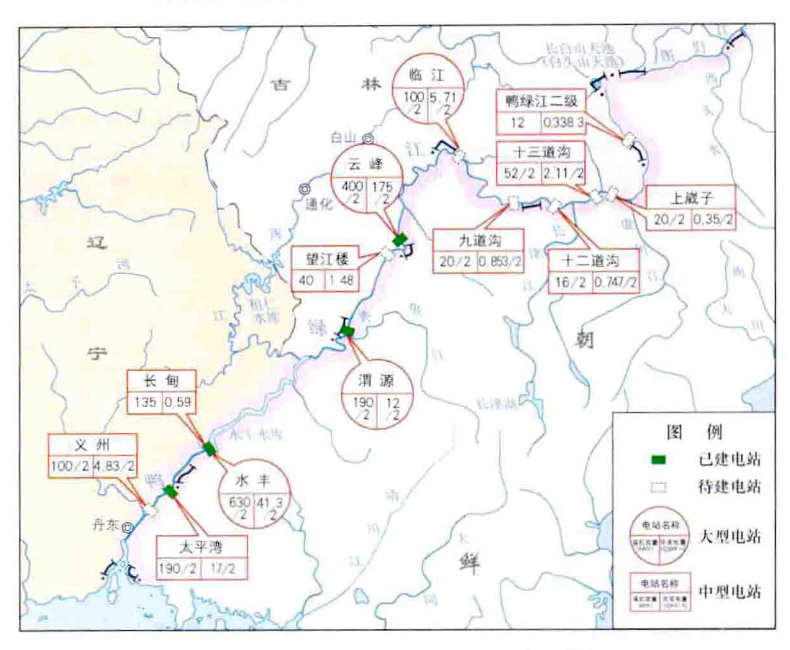
压力上升率允许值　在计算成果的基础上，经分析并留有适当裕度后确定，是电站调节保证值之一。根据工程经验，一般推荐水轮机蜗壳压力上升率允许值的取值范围是：额定水头小于 20m 时，宜为 70%～100%；额定水头为 20～40m 时，宜为 70%～50%；额定水头为 40～100m 时，宜为 50%～30%；额定水头为 100～300m 时，宜为 30%～25%；额定水头大于 300m 时，宜小于 25%（可逆式蓄能机组宜小于 30%）。很多情况下，由于受到水工建筑物布置的限制而导致输水系统较长，抽水蓄能电站可逆式蓄能机组的蜗壳最大压力上升率难以满足推荐的小于 30%的要求，经充分的经济技术比较后，抽水蓄能电站可逆式蓄能机组的蜗壳最大压力上升率可以适当放宽。

Yalu Jiang shuidian guihua

鸭绿江水电规划　（hydropower development planning of Yalu River）　鸭绿江干流上规划有鸭绿江二级、鸭绿江三级、南尖头、上崴子、十三道沟、十二道湾、九道沟、临江、云峰、望江楼、文岳、渭源、水丰、长甸、太平湾、义州等 16 级水电站，总装机规模 2347MW，多年平均年发电量 99.4 亿 kW·h。梯级水电站布置见图。

鸭绿江流域跨中国和朝鲜两国。鸭绿江干流是两国的界河，发源于长白山南麓，从东北流向西南，注入黄海，流域面积 64 471km^2，朝鲜在其国内从本流域跨流域引水到其他流域，扣除朝鲜跨流域引水面积 5326km^2 后为 59 145km^2，中国侧为 32 021km^2。河流全长 816km。鸭绿江河口处多年平均流量为 1007m^3/s。

鸭绿江干流开发任务主要是以发电为主，结合防洪、灌溉、工业用水、航运等综合利用要求。鸭绿江梯级规划工作由中国、朝鲜两国政府共同组建的中朝鸭绿江干流规划工作小组（20 世纪 80 年代改为中朝鸭绿江、图们江干流规划小组）进行。经长期研究协商后已经确定八道沟以下河段的梯级组成，见图。



鸭绿江干流梯级水电站布置图及开发现状

临江梯级以上均未开工建设，临江梯级以下云峰、渭源、水丰、长甸、太平湾等 5 座水电站已经建成，望江楼和文岳水电站正在建设。水丰水电站于 1937 年开始建设，1945 年投入 6 台机组运行，后因战争部分破坏；1958 年完成改建，装机规模 630MW；1971 年，中朝两国政府决定，在各自境内扩建一座厂房，各装设 2 台 67.5MW 的机组，中方的长甸水电站就是按照此决定建设的。水丰水电站是鸭绿江上第一座水电站，2009 年 8 月，对水丰大坝防洪设施进行改造；2011 年 7 月，防洪设施改造工程完成，正式移交朝方使用。云峰水电站于 1959 年开始建设，1969 年全部投产，装机规模 400MW。太平湾水电站始建于 1982 年，1987 年全部投产，装机规模 190MW；渭源水电站 1980 年开工建设，1988 年建成，装机规模 390MW。2010 年 4 月，中国与朝鲜合作建设的望江楼和文岳水电站正式开工，其中望江楼水电站装机容量为 40MW，发电厂位于中方一侧；文岳水电站装机容量 40MW，发电厂位于朝方一侧。已建的 4 座水电站是中国、朝鲜两国地区电网的主要电源，为地区国民经济发展起了重要作用。水丰和云峰水电站的水库库容较大，可进行多年调节，是梯级的骨干工程。临江水电站具有不完全年调节水库，而渭源和太平湾水电站的水库只进行日调节。

Yalu Jiang shuixi Zhongguo bufen shuineng ziyuan

鸭绿江水系中国部分水能资源　[hydropower resources of Yalu River System（within China）]　据《中华人民共和国水力资源复查成果（2003 年）》统计，鸭绿江水系中国境内部分水能资源理论蕴藏量为 186.56 亿 kW·h/a，仅占中国水能资源的 0.31%；其中技术可开发装机容量 2217.78MW，多年平均年发电量 79.72 亿 kW·h，仅占中国水能资源的 0.32%。鸭绿江干流为中国和朝鲜的

国界河流，其能量按中国和朝鲜各半统计。水系中国部分水能资源分布见表。

鸭绿江流域全水系流域面积 64 471km²，其中在中国境内的有 32 000km²，位于吉林和辽宁两省。鸭绿江干流发源于长白山天池，自东北流向西南。干流西侧为中国，东侧为朝鲜。西侧主要支流有浑江、蒲石河和叆河。浑江发源于长白山系的老岭，自北向南流。其流域面积为 15 377km²。鸭绿江干流及浑江是本流域中水能资源最丰富的河流。

鸭绿江水系中国部分水能资源分布表

河流名称	流域面积 (km²)	河道长度 (km)	天然落差 (m)	理论蕴藏量 (亿 kW·h/a)	技术可开发量		
					电站数量 (座)	装机容量 (MW)	年发电量 (亿 kW·h)
鸭绿江水系合计	64 471			186.56	139+11/2	2217.78	79.72
干流：鸭绿江		816	2437	90.91	4+11/2	1259.8	51.75
支流：浑江干流	15 377	476.3	755	40.15	14	651.35	17.81
其他支流				55.5	121	306.63	10.16

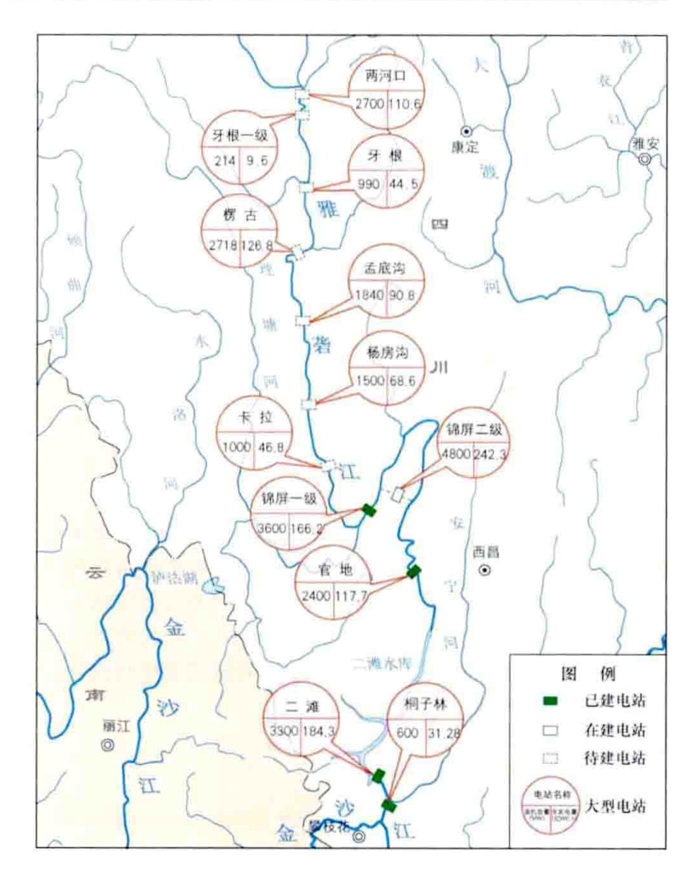
鸭绿江流域雨量充沛，平均降水量 870mm，自上游向下游递增。干流河长 816km，大部河道流经山区，河谷宽一般为 500～2000m，河口多年平均流量 1007m³/s，水能资源开发条件好，是本水系中技术可开发资源最多的河流，按中国、朝鲜两国各半统计，中国拥有理论蕴藏量 90.91 亿 kW·h/a。技术可开发 4＋11/2 座水电站，装机容量 1259.8MW，多年平均年发电量 51.75 亿 kW·h。

浑江是鸭绿江右岸最大支流，河长 476.3km，流域面积 15 377km²，河口多年平均流量 231m³/s。浑江河道多蛇曲，河谷多处狭窄，水能资源开发条件也较好。浑江干流理论蕴藏量 40.15 亿 kW·h/a，干流技术可开发装机容量 651.35MW，多年平均年发电量为 17.81 亿 kW·h。

Yalong Jiang shuidian guihua

雅砻江水电规划

(hydropower development planning of Yalong River)　根据已批复的《四川省雅砻江下游（卡拉至桐子林河段）水电规划报告》和《四川省雅砻江中游（两河口至卡拉河段）水电规划报告》，雅砻江中下游梯级水电站由两河口、牙根、楞古、孟底沟、杨房沟、卡拉、锦屏一级、锦屏二级、官地、二滩、桐子林共 11 级水电站组成（雅砻江中下游梯级水电站见右图）。11 级水电站共利用水头 1900m 以上，总库容 267 亿 m³，其中调节库容 150 亿 m³，总装机容量和多年平均年发电量分别为 25 800MW 和 1364 亿 kW·h，约占雅砻江全梯级的 88%。雅砻江上游水电规划工作正在开展中。



雅砻江中下游梯级水电站布置图及开发现状

雅砻江发源于青海省巴颜喀拉山南麓，由北向南纵贯四川省甘孜藏族自治州和凉山彝族自治州，于攀枝花市汇入金沙江。流域面积 13.6 万 km²，干流河长 1368km，天然落差 3180m，河口桐子林处多年平均流量 1890m³/s。干流水能理论蕴藏量为 1907 亿 kW·h/a。

雅砻江规划开发任务以发电为主。雅砻江梯级水电站将在四川省电力系统中占有主导、骨干地位。雅砻江梯级中有两河口、锦屏一级和二滩 3 座调节性能好的水库可以提高电力系统水电站群整体的供电质量。雅砻江两河口以下河段具有地形地质条件良好、径流丰富、含沙量小、水库淹没少、技术经济指标较优等优点，所以两河口以下河段是近期的重点开发对象。最早建成的二滩水电站正常蓄水位 1200m，装机容量 3300MW，单独运行时多年平均年发电量 170 亿 kW·h，于 1991 年 9 月 14 日开工，1998 年 8 月第一台机组发电，1999 年 12 月全部机组均投产发电。锦屏一级、锦屏二级、官地、桐子林水电站已开工建设并陆续投产发电。

Yaluzangbu Jiang shuixi shuineng ziyuan

雅鲁藏布江水系水能资源

(hydropower resources of Yarlungzangbo River System)　据《中华人民共和国水力资源复查成果（2003 年）》统计，雅鲁藏布江水系中国境内部分的水能资源理论蕴藏量为 9976.93 亿 kW·h/a，占中国水能资源的 16.4%，仅次于长江水系而居中国第二位；其中技术可开发资源装机容量 67 849.6MW，多年平均年发电量 3572.60 亿 kW·h，占中国水能资源的 14.4%，也居中国第二位。

雅鲁藏布江发源于中国西藏自治区西南部喜马拉雅山北麓的杰马央宗冰川，河源称杰马央宗曲，里孜以下称雅鲁藏布江。江水自西向东流经日喀则、泽当等地，在米林县下游河道形成一大河弯后折向南流，经巴昔卡后进入印度，称布拉马普特拉河，于孟加拉国与恒河相汇合后流入印度洋。

雅鲁藏布江是世界上海拔最高的一条大河，河源海拔5590m，中上游河段海拔3000m以上，下游河道急剧下切，出中国境处海拔155m，落差巨大，水能资源十分丰富。干流的理论蕴藏量达6930.56亿kW·h/a，占全水系的69.5%，而且集中于林芝县以下河段，形成可能开发巨型水电站的特殊条件。支流蕴有的水能资源比重较小，其中较丰富的支流有拉萨河、尼洋曲、帕隆藏布、易贡藏布和锡约尔河，其理论蕴藏量在297.5亿～869.8亿kW·h/a之间。

雅鲁藏布江水能资源可达到70 000MW左右，多年平均年发电量约3500亿kW·h，主要集中在干流下游河段。干流从林芝县到墨脱县为一大河弯，河道长213km，落差达2190m，而河弯两端间的直线距离仅39km，水能资源十分丰富，是世界少有的水能资源富矿。

Yaxileita Shuidianzhan

雅西雷塔水电站 (Yacyreta Hydropower Station)

位于南美洲巴拉那河阿根廷与巴拉圭两国边界河段上，在伊泰普水电站下游470km处，见图1。电站设计装机容量4140MW，初期装机容量2760MW，多年平均年发电量203亿kW·h。电站开发任务除发电外，兼有航运、灌溉巴拉圭侧8.1万hm^2和阿根廷侧0.6万hm^2耕地的功能。阿根廷侧采用500kV超高压输电，巴拉圭侧采用220kV高压输电。工程由雅西雷塔两国委员会建设和管理，建设期投资全部由阿根廷筹措，建成投产后，巴拉圭把应分得的大部分电量交阿根廷使用，以偿还应分担的一半投资的本息，还清后各按50%分电分利。



图1 雅西雷塔水电站

水文和水库特性 坝址以上流域面积97万km^2，多年平均流量11 900m^3/s，年径流量3750亿m^3。水库正常蓄水位82.00m，相应库容210亿m^3，调节库容19亿m^3，仅能作周、日调节。设计水头21.3m。设计洪水采用可能最大洪水，洪峰流量95 000m^3/s，最高拦洪水位84.50m。

枢纽布置 枢纽工程由大坝、泄水建筑物、厂房、通航建筑物等组成，见图2。

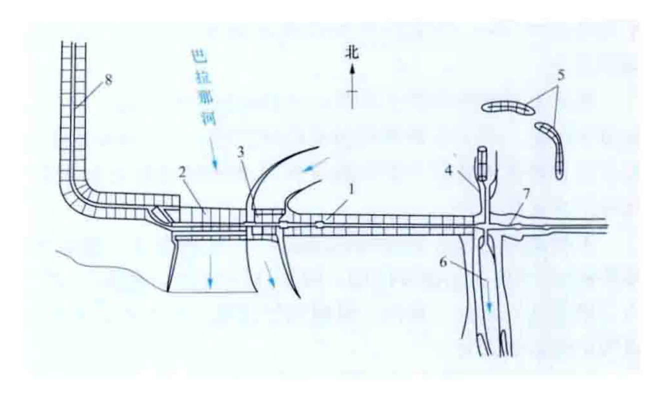


图2 雅西雷塔水电站主要工程平面图

1—主坝；2—发电厂房；3—主溢洪道；4—船闸闸室；5—防浪堤；6—引航道；7—左侧心墙土坝；8—雅西雷塔河心岛副坝

大坝 包括主坝、左岸土堤（长15 000m）、左岸心墙土坝（长1800m）、右岸雅西雷塔河心墙的副坝(长18 400m)、右岸土堤（长30 700m）等，建筑物挡水前沿总长69 600m。主坝为心墙土坝，坝顶长1900m，最大坝高42m。

泄水建筑物 包括主溢洪道（宽343.5m）和跨越副河槽的安娜夸副溢洪道（宽307.00m)。主溢洪道设18个溢洪孔，每孔净宽15m、高19.5m；副溢洪道设16个溢洪孔，每孔净宽15m、高15.5m。孔口用弧形闸门控制，采用消力池消能。在最高拦洪水位时，两座溢洪道的泄洪量分别为55 000m^3/s和40 000m^3/s。

阿根廷侧和巴拉圭侧的灌溉进水口，分别建在左岸土堤和右岸土堤上。

厂房 河床式厂房，长808m。厂房内初期安装20台转桨式水轮发电机组，单机容量138MW，共装机2760MW，预留扩建10台机组的地位。水轮机额定水头21.3m，转轮直径9.45m，转速71.4r/min。发电机额定容量172.5MV·A，功率因数0.9，电压13.2kV，频率50Hz。每台发电机连接1台三相变压器，升压至500kV。电站设2台500kV/220kV自耦变压器。

通航建筑物 船闸闸室净宽27m、长236m，可通过吃水深为3.66m的船只，上游设有防浪堤。船闸的上闸首闸门采用高9m的轮式门，下闸首闸门采用30.3m高的人字门。

工程施工 工程于1983年12月开工，1994年发电，1996年竣工。

主要工程量：土石方开挖2180万m^3，土石方填筑6440万m^3，混凝土浇筑330万m^3。

Ya Zhou shuineng ziyuan

亚洲水能资源 (hydropower resources of Asia)

根据英国《国际水电与大坝》杂志2011年发布的《World Atlas》统计，亚洲（包括俄罗斯和土耳其）水能资源理论蕴藏量超过197 171亿kW·h/a，技术可开发量超过76 850亿kW·h/a，经济可开发量44 779亿kW·h/a，居各大洲首位。

亚洲陆地面积约为4400万km^2，气候跨寒、温、热三带。东亚的东南部、东南亚是湿润区，北亚的大部为半湿润、半干旱区，中亚、西亚及东亚内陆为干旱区。干旱区占全洲面积的1/3。亚洲地形起伏大，山地、高原和丘陵占全洲面积的3/4，中部有世界最高的高原和山脉。全洲

平均海拔 950m，是南极洲外世界地势最高的洲，许多河流落差大。

基于上述地形和降水条件，亚洲水能资源丰富，且主要分布于东亚、南亚和俄罗斯的西伯利亚地区。中国水能资源最丰富，居世界首位。俄罗斯亚洲部分水能资源也很丰富，见俄罗斯水能资源。

亚洲水能资源丰富的河流有长江、叶尼塞河、勒拿河、雅鲁藏布江-布拉马普特拉河、狮泉河-印度河、澜沧江-湄公河、黑龙江、黄河、珠江、阿姆河等河流。长江水系水能资源为世界各河之首。

勒拿河长 4400km，流域面积 241.8 万 km^2，河口处年平均径流量 17 000m^3/s。勒拿河及其支流构成的水道网相对稠密，水量充沛，水能资源较为丰富，可开发量约 60GW，开发程度较低。

澜沧江-湄公河上游在中国境内称澜沧江，发源于中国青藏高原念青唐古拉南麓，流经缅甸、老挝、泰国、柬埔寨和越南，注入南海，流域面积 74.4 万 km^2，干流全长约 4500km，落差 5060m，平均年径流量 4750 亿 m^3。澜沧江-湄公河上游在中国境内的水能资源见澜沧江水系水能资源；出中国国境以下干流上规划了 12 级水电站，总装机规模约 13.43GW，均未开发建设。

狮泉河-印度河发源于喜马拉雅山西部中国西藏境内的狮泉河，流经印度和巴基斯坦，注入阿拉伯海，流域面积 103.4 万 km^2，干流全长约 2900km，平均年径流量 2070 亿 m^3。印度河流域内已建的水电站总装机规模约 15GW，拟建或研究中的电站装机规模约 15GW，共计约 30GW。巴基斯坦境内印度河干流塔贝拉水电站装机容量 3478MW，为南亚已建最大的水电站。

yanbao

岩爆 (rock burst)　地下工程开挖中，岩体中聚积的应变能在一定条件下的突然猛烈释放，导致岩石爆裂并弹射（或喷射）出来的现象。是围岩失稳现象中的一种，因具有突发性，对施工人员和设备构成严重威胁。

岩爆多在开挖面附近发生，往往伴有破裂声，甚至爆炸声，在开挖初期活跃，持续一段时间后趋于平静。岩爆造成的围岩破坏，有的呈劈裂状，有的呈剪切破坏状。轻微的岩爆仅将破坏后呈片状的岩石弹射脱离岩体，严重的岩爆可将破坏成大块体的岩石强烈地喷射到远处。

埋深较大以及处在高地应力地区是发生岩爆的重要条件。地形和地质构造使天然岩体中局部应力集中的地区，开挖隧洞后也具有产生岩爆的条件。产生岩爆的条件是：①围岩应力集中形成的局部高应力状态；②围岩完整、脆性，容易发生断裂及脆性破坏；③能量足够，即岩石破坏释放的应变能除了供破坏消耗之外，还有足够的剩余能量转化为动能，造成岩石弹射（或喷射）。

防治岩爆最根本的办法是根据地质、地形和地应力状态选好洞线位置及断面形状。岩爆往往在开挖后瞬间发生，用工程措施对它进行防治比较困难。在围岩上钻孔可以释放部分应变能并改善围岩应力状态，在开挖面打超前钻孔，效果更好。往钻孔中注水可以改变岩石弹性性质，钻孔附近微裂隙的发生，使岩体中储存的应变能下降，使发生岩爆的机会减少或者使岩爆减弱。对于随时间持续发生岩爆的部位，用喷混凝土或锚杆加固岩体的办法可以收到良好效果，在开挖后越早进行越好。

为保障施工人员和设备的安全，可以根据脆性岩石破坏过程中出现微破裂时伴发脉冲波的现象，采用微震仪或声发射仪监测；或者根据岩石破裂过程中的扩容现象，用变形仪或收敛计监测围岩变形，做出安全预报。

yanji chuli

岩基处理 (treatment of rock foundation)　提高水工建筑物岩石地基强度、完整性、抗渗性和耐久性的工程措施。岩基中存在节理、裂隙、断层破碎带、软弱岩（夹）层和喀斯特等地质构造，不同程度地破坏了岩体的完整性，削弱了岩体的力学强度，通过适当的处理，使岩基变形、承载能力和渗漏量等满足工程要求，保证水工建筑物的正常运行。

岩基处理分为提高岩基强度和完整性的加固处理、防止岩基渗漏和降低渗透压力的防渗处理以及喀斯特处理等。

岩基加固处理　通常包括对断层破碎带、软弱岩（夹）层和河床深槽采用的混凝土置换法处理，防止岩基不均匀沉降或承载能力不足的处理，以及防止岩基滑动的处理。

（1）对于断层破碎带、软弱岩（夹）层和河床深槽常用混凝土置换法处理。对宽度小、倾角陡的断层破碎带或软弱岩（夹）层，当其对岩基的强度和压缩变形影响不大时，可将其挖除到一定深度并清除两侧破碎岩石，然后用钢筋混凝土填塞，其上铺设钢筋网。宽度较大的陡倾角断层破碎带或软弱岩（夹）层，将引起坝体和岩基中应力分布恶化，可将其挖到一定深度并清除两侧破碎岩石，然后浇筑混凝土梁（或厚板）。处理深度按简支梁或固端梁，以梁的挠度或梁底混凝土抗拉强度作为控制标准，用弹性力学或材料力学方法计算确定。对走向平行于河谷、直立或陡倾角、宽度较大的断层破碎带或深槽，其两侧为完整、坚硬的岩石时，为减少基坑开挖量，可在其上设置混凝土拱，将坝体荷载传到两侧岩基，同时在拱下做好防渗处理。

（2）防止岩基不均匀沉降或承载能力不足的处理。对于坝基范围（包括两岸坝肩）内的风化破碎岩石，可将其挖除至新鲜完整岩石或符合设计要求为止。当因开挖工程量或施工条件限制不能彻底挖除时，可进行固结灌浆，使其强度和变形满足设计要求。为防止岩基不均匀沉降或承载能力不足对坝体的影响，可采取扩大坝基面积、限制坝底压应力不大于岩基允许压应力、对坝体合理分缝等结构措施。根据各部位岩基变形特性，采取合理的坝体分块浇筑程序，也可达到调整岩基中的应力状态和不均匀沉降的目的。

（3）防止岩基滑动的处理。包括：①当岩基中缓倾角的断层破碎带、软弱岩（夹）层埋藏较浅时，可适当加大开挖深度，将其全部（或部分）挖除。将基坑断面开挖成倾向上游有利于提高坝基的抗滑能力。②当岩基中缓倾角的断层破碎带、软弱岩（夹）层埋藏较深，不能将其彻底挖除时，可在坝基范围沿坝轴线方向开挖一齿槽将其切断，然后回填混凝土或钢筋混凝土，形成与坝体相结合的抗滑齿墙。齿墙设置的部位和尺寸根据结构布置和抗滑要求确定。通常抗滑齿墙与灌浆帷幕相结合，同时起到岩基防渗作用。③当岩基中缓倾角软弱岩（夹）层埋藏较深，在其上下侧均为坚硬岩

石，软弱岩（夹）层的存在影响岩基抗滑稳定时，可在软弱岩（夹）层中通过洞挖将其挖除后回填混凝土或钢筋混凝土，形成抗剪键（洞）提高其抗滑能力。④当岩基中存在多层缓倾角软弱岩（夹）层时，采用锚杆或预应力锚索（杆）锚固，以增加软弱面上的法向应力，提高其抗滑能力。甚至可在大口径钻孔或竖井中设置锚筋桩或浇筑钢筋混凝土抗滑桩。⑤当拱坝两岸拱座部位岩石破碎无法利用，如将其挖除高程又不够时，可浇筑混凝土重力墩，以满足坝肩稳定要求。

岩基防渗处理　包括：①混凝土截水墙。有时与抗滑齿墙处理方法相结合，在坝踵沿坝轴线方向开槽挖到相对不透水岩层，然后用混凝土填塞形成截水墙；有时为满足防渗要求，在截水墙下设置灌浆帷幕；对坝基顺河陡倾角断层破碎带，可在坝踵部位通过大口径钻孔或竖井，挖除其中充填物和破碎岩石，然后回填混凝土形成截水墙。②灌浆帷幕。根据坝基的水文地质、工程地质条件确定帷幕布置及其向两岸延伸的长度。防渗帷幕应伸入相对隔水层内3～5m。当坝基相对隔水层埋藏较深或分布无规律时，帷幕深度通常在0.3～0.7倍水头范围内选择（见防渗帷幕）。③防渗铺盖。在坝前和库底填筑黏土或混凝土层形成防渗铺盖，达到延长坝基渗径和减少渗漏量的目的。④排水孔。为消除或减少渗透压力（扬压力）和渗漏水对坝基的影响，通常在岩基中开挖隧洞或在坝体底部设置廊道，并钻排水孔，形成排水系统。

喀斯特处理　包括：①大面积溶蚀未形成溶洞的可做铺盖防渗。②对坝基范围内处于地表或埋藏较浅的溶槽、溶洞等，采用明挖挖除其中充填物和周围破碎岩石，冲洗干净后用混凝土等填塞，同时起到加固和防渗作用。③对处于坝基深部的溶槽、溶洞等，通过钻孔，用高压循环水流（或水气混合体）冲洗其中充填物后，用水泥砂浆等灌浆填塞；或用高压劈裂灌浆技术，固定溶洞内充填物，形成完整的防渗帷幕；或采用混凝土防渗墙。④库岸边处可做防渗隔离措施。中国乌江渡水电站大坝修建在发育的石灰岩岩基上，采用高压水泥灌浆填塞岩基中充填泥沙的溶洞，具有很好的防渗效果。

yanrong

岩溶

（karst；carst）　水对可溶性岩石以溶蚀为主的地质作用过程及其所产生的各种现象的总称。又称喀斯特。原是前南斯拉夫西北部伊斯特拉半岛（现属克罗地亚）上的石灰岩高原的地名。中国及世界上可溶性岩石分布很广，中国的岩溶主要集中于西南、中南地区。岩溶发育规律及其水文地质特征的研究，对于工程建设具有重要意义。

岩溶形成的基本条件　必须具备岩石的可溶性、岩体（石）的透水性、水的流动性、水的侵蚀性4个基本条件。

（1）岩石的可溶性。可溶性岩石是岩溶作用的物质基础，其岩石成分和结构特点影响岩溶的性质和发展速度。按岩石成分，可溶性岩石可分为碳酸盐类岩石（石灰岩、白云岩及大理岩等）、硫酸盐类岩石（石膏等）、岩盐类岩石（岩盐、光卤石等）3类。其中岩盐类溶解度最大，硫酸盐类次之，碳酸盐类最小。但碳酸盐类岩石分布面积最广，最具工程意义。在其他条件相同情况下，质纯的石灰岩比含有杂质的泥质灰岩、白云岩易于溶解。从岩石结构上看，粗粒或多孔石灰岩较细粒或隐晶质石灰岩易受溶蚀。

（2）岩体（石）的透水性。有利于地表水入渗及地下水循环，促使岩溶作用的发展。岩体（石）透水性取决于构造的发育程度及孔隙度。断层、裂隙及层面是地下水的良好通道，岩溶就相对发育。岩石孔隙对岩溶发育有一定影响，蜂窝状溶蚀孔洞即地下水沿孔隙长期作用的结果。

（3）水的流动性。水的流动持续地将溶解物质带走，水与岩石的化学反应达不到平衡状态，溶蚀作用继续进行，岩溶就不断发育。

（4）水的侵蚀性（溶解能力）。主要取决于水中碳酸的含量，即随水中侵蚀性CO_2增多而增强。水中CO_2来源于大气降水补给以及地表土壤的生物化学作用。水温对溶蚀能力也有影响，水温越高，溶蚀能力越强；反之，溶蚀能力越弱。

岩溶形态　包括：①溶沟与石芽。溶沟为地表径流沿岩石表面或裂隙溶蚀的石质沟槽。溶沟间凸出的石脊称石芽，高大陡立的成片石芽称为石林。②溶斗。漏斗状或碟状的封闭洼地，由溶蚀伴随塌陷等作用形成，底部常有堆积物。③落水洞。地表或洼地底部通向地下溶洞或暗河的竖向洞穴，洞径大小不一，形态也不规则，或垂直，或倾斜，甚至呈曲折状。④溶洞与暗河。溶洞是地下径流溶蚀岩石而成的地下洞穴，规模不等，形状不一。溶洞多连通成串，构成高低曲折、时宽时窄的地下廊道。沿地下溶洞形成的水流通道称为暗河（见图），明暗相间的暗河称伏流。⑤溶蚀洼地与坡立谷。溶蚀洼地是底部较平坦、面积较大的盆状洼地，底部常有溶斗或落水洞分布。坡立谷为规模比溶蚀洼地更大的狭长形盆地，底面积可达几十至几百平方公里。谷地平坦，上覆有溶蚀残余的黏土及坡、冲积物等。通常有河流穿越盆地。⑥盲谷与干谷。地表河流沿落水洞流入地下，河谷前端突然中断的地形称盲谷。地表河流转入地下后，原河道干涸无水的河谷称干谷。⑦峰林。基部微微相连的成群分布的山峰，多出现在盆地周边。⑧天生桥。水平溶洞或暗河顶部坍塌后的残余部分。



暗河

岩溶发育规律　主要体现在岩溶垂直分带性和不均一性两个方面。

（1）岩溶垂直分带性。在垂直带的不同位置中，发育不同形态特征的岩溶现象。①包气带。自地表至地下水面之间，地下水以间歇性的垂直循环为主，主要形成落水洞、溶斗等垂直向或斜向的岩溶形态。②地下水位季节变化带。地下水运动为水平循环与垂直循环周期性交替，以水平循环为主，此带岩溶作用强烈，主要形成水平溶洞、暗河等岩溶形态。③完全饱和带。水的运动受当地水文网排泄作用影响，

河谷两侧以水平循环为主，河谷底部自下向上流动。在地下水面附近形成近于水平的溶洞，河谷底部多形成规模不大的溶洞或溶孔。④深层循环带。地下水运动不受当地水文网影响，循环交替缓慢，岩溶形态多为蜂窝状溶孔。

（2）岩溶不均一性。在同一岩溶地区，岩溶发育随地下水循环交替条件的差别及地壳运动的变化，具有明显的空间分带性。在水平方向上，排泄区附近岩溶作用最为强烈，反映在河谷两岸岩溶发育，向分水岭地区逐渐减弱；在垂直方向上，一般在当地侵蚀基准面（河谷谷底）以下岩溶发育的程度有随着深度增加而逐渐减弱的趋势。由于地壳上升和相对稳定期的相间交替，常形成与阶地高程相对应的层状溶洞。在可溶岩与非可溶岩交界处、断层带、裂隙交汇处，岩溶常明显较其他地区发育。

岩溶发育阶段　岩溶发育过程与地壳运动密切相关，在地壳上升的情况下，经历幼年期、壮年期和老年期 3 个阶段。①幼年期。地表形成许多溶沟和石芽，溶斗和落水洞广泛发育，地表水系开始破坏，有的河道变为盲谷或干谷，地下暗河初步形成。②壮年期。溶斗和落水洞的发展和扩大，使地表形成溶蚀洼地和坡立谷。地下暗河不断发展，形成完整的地下水系。部分暗河由于顶部的崩塌变为明流。在此阶段地面起伏很大，形成峰林地貌。③老年期。地下暗河及溶洞的大量崩塌，形成了地表水系。溶蚀洼地与坡立谷不断加深，使谷底接近地下水面形成沼泽或湖泊。峰林经溶蚀或塌陷仅残余一些孤峰和残丘。研究调查地区的岩溶发展阶段及其发育历史，有利于掌握岩溶发育的特点和分布规律。

岩溶与经济建设　岩溶地貌千姿百态，景观绮丽，可作旅游胜地，如桂林山水。岩溶地下水量丰富，水质优良，是灌溉、饮用和工业用水的良好水源。岩溶与矿产生成也有关系，如铝土矿等。古岩溶还可成为石油和天然气的富集地点，如任丘油田。但是，岩溶引起的渗漏、塌陷、涌水等地质灾害往往给采矿和水电工程建设带来很大困难。

岩溶与水电工程　在岩溶地区修建水电工程，除了地下洞室会遇到溶洞、涌水等困难外，最主要的是库坝区的岩溶渗漏问题。严重的渗漏不仅使水库发挥不了效益，还可导致地基失稳而危及大坝安全。岩溶具有极明显的垂直分带性和不均一性。由于岩溶发育、分布规律复杂，在岩溶地区修建水电工程，必须慎之又慎，应投入比较大的勘测工作量，进行专门的工程地质勘察。库坝址的选择必须充分利用隔水层和有利的水文地质条件，如选择周边有隔水层或有高地下分水岭的地段建库，在有隔水层存在的横向谷地区建坝。在无隔水层或有隔水层分布的纵向谷地段建坝，要在充分掌握岩溶发育规律和水文地质条件的基础上，结合工程的特点和要求，因地制宜地综合考虑铺（黏土或混凝土铺盖）、堵（堵漏水洞）、围（围落水洞、溶斗等）、截（截断渗漏通道）、灌（防渗帷幕灌浆）等工程处理措施。只要精心勘测、精心设计、精心施工，在岩溶地区同样可以成功地修建水电工程。如中国贵州乌江渡、东风、索风营、构皮滩水电站，采用高压灌浆工艺，结合综合处理措施，建成了大面积的防渗帷幕，渗漏量均比预计的要小得多。

yansai baopo

岩塞爆破

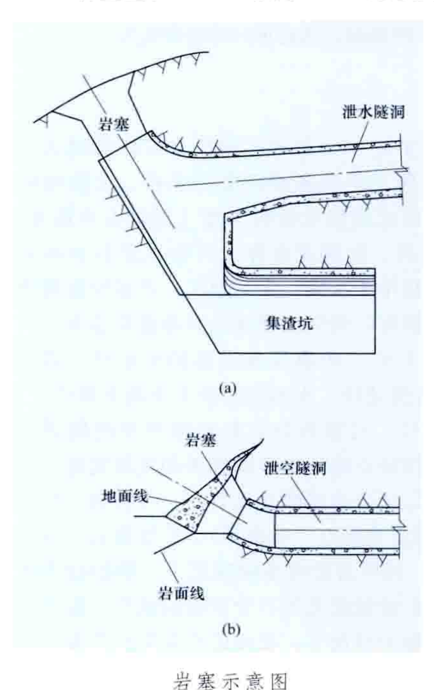
（rock plug blasting）　从已有水库、湖泊引水时，将隧洞进水口处预留的岩体（又称岩塞）一次炸除形成进水口的爆破技术。当采用岩塞爆破方案时，在进水口部位按要求预留一定厚度的岩石满足挡水要求，以便进行隧洞施工，待隧洞内各项工程全部完成，将预留的岩石一次爆通，形成进水口。

爆破设计　在岩塞爆破前首先要做好设计，包括：①选定进水口的位置和形式。岩塞爆破形成的进水口，一般不再进行其他措施的加固，因此在选择进水口的位置和形式时，既要注意选择地形、地质条件，保持岩塞稳定并便于施工，爆破后进水口岩体及边坡应保持稳定，又要考虑运行的要求，具有一定的过水断面和较好的水力条件。应对进水口部位进行详细的地形、地质勘测工作。②选定岩塞爆破方案，包括预留岩塞的厚度、爆破方式、岩渣处理方式等。

爆破方案　包括：①爆破方式，常采用洞室爆破或钻孔爆破两种爆破方式。前者在预留的岩塞内开挖洞室作为药室，后者则用钻机钻孔作为炮孔。为保证爆破后的进水口形状符合设计要求，常沿设计轮廓线布置较密的周边孔，结合进行预裂爆破或光面爆破。②岩渣处理方式，常采用集渣或泄渣两种。前者在岩塞的下部事先开挖集渣坑，爆破后大部分岩渣落在集渣坑内，后者则依靠水力将岩渣泄到隧洞下游。③当采用集渣方式时，又有敞开和堵塞两种方法。前者洞内闸门敞开，爆通后水流下泄，岩渣落入集渣坑内；后者在隧洞内设临时堵塞段，爆破后再拆除，此法不常使用。④爆破参数及装药量按洞室或排孔爆破分别选择计算。

起爆方式　岩塞爆破一般采用电力起爆，常采用主、副电爆网络进行并、串联形成复式网络，有时附加导爆索引爆，以确保起爆的可靠性。为减小爆破震动效应，避免对周围建筑物造成破坏，常采用毫秒雷管接力起爆。

中国丰满水电站于 20 世纪 70 年代在左岸增建一条泄水隧洞，进口岩塞爆破采用洞室爆破和集渣方式，见图（a）。岩塞直径 11m、厚度 15m，爆破药量 4.1t，爆破方量约为 3800m^3。密云水库在潮河主坝右侧增建一条泄空隧洞，于 1980 年进行进口岩塞爆破，采用排孔爆破和泄渣方式，见图（b）。岩塞底部直径 5.5m，岩塞厚度 5.8m，爆破药量 738kg，爆破方量 546m^3。加拿大休德巴斯（Chute Des Passes）水电站的引水隧洞进口工程，岩塞直径约 18m、厚 21m，爆破药量 27.7t，爆破方量 1 万余立方米。



岩塞示意图

（a）丰满水电站泄水隧洞进口；（b）密云水库泄空隧洞进口

yanshi

岩石 （rock） 由一种或多种矿物组成的，具有一定的结构、构造的集合体。它是固体地壳的主要组成物质，常作为建筑物地基、地下洞室围岩等的介质。岩石的坚硬程度和强度取决于成因类型、矿物成分和结构构造。按其成因分为岩浆岩、沉积岩、变质岩3大类。岩浆岩和沉积岩经变质作用成为变质岩，将原岩为火成岩的变质岩称正变质岩，原岩为沉积岩的称副变质岩。

岩浆岩 由地壳内的岩浆上升或喷发冷凝固化而成的岩石，又称火成岩。根据岩石生成的位置可分为侵入岩和喷出岩。①侵入岩。岩浆通过地壳薄弱带上升未达地表已冷凝固结成岩石。形成于距地表3km以下的称深成岩，多为大岩体；形成在地表以下3km以内的称浅成岩，常为小岩体。侵入岩在地下深部相对密封条件下形成，冷却速度慢、压力高、挥发成分逸散慢，矿物结晶较粗，多呈显晶质结构，如花岗岩、正长岩、辉长岩等。②喷出岩。岩浆沿地壳薄弱带上升，由火山喷出地表成岩，亦称火山岩。一种是从火山溢流出的岩浆冷凝而成的岩石称熔岩，常呈岩流形式，如玄武岩；另一种是由火山喷发出来的各种碎屑物质从大气中降落下来堆积形成的岩石，粗颗粒的有火山碎屑岩，细颗粒的有凝灰岩等。由于岩浆在地表条件下冷却较快，喷出岩的结晶都比较细，多呈隐晶质结构、斑状结构或玻璃质结构，如流纹岩、安山岩、黑曜岩等。

侵入岩强度高、岩性均一，一般较完整，透水性小，常是较好的高坝坝基。喷出岩岩性较复杂，强度差别大，作为高坝地基需要进行较详细的勘察研究工作。侵入岩与围岩的接触带、蚀变带，喷出岩内的喷发间断面常是强度较低的、影响岩体稳定的软弱带（面），往往是工程地质勘察的重点。通用的岩浆岩分类见表1。

表1 岩浆岩分类表

<table>
<tr><th colspan="4" rowspan="2">岩石类型</th><th>超基性岩</th><th colspan="3">基性岩</th><th>中性岩</th><th colspan="2">酸性岩</th><th>碱性岩</th></tr>
<tr><th>橄榄岩-苦橄玢岩类</th><th colspan="3">辉长岩-玄武岩类</th><th>闪长岩-安山岩类</th><th>正长岩-粗面岩类</th><th>花岗岩-流纹岩类</th><th>霞石正长岩-响岩类</th></tr>
<tr><td colspan="4">颜色</td><td>黑、绿黑</td><td colspan="3">黑、黑灰</td><td>黑灰、灰</td><td>灰、肉红</td><td>肉红、浅灰、灰</td><td>浅灰、肉红</td></tr>
<tr><td colspan="4">SiO_2含量（%）</td><td><45</td><td colspan="3">45～52</td><td colspan="2">52～65</td><td>>65</td><td>52～65</td></tr>
<tr><td rowspan="3">矿物成分</td><td colspan="3">石英含量（%）</td><td>76</td><td colspan="3">76</td><td>5～10</td><td>无或含量少</td><td>>15</td><td>无</td></tr>
<tr><td colspan="3">长石的种类</td><td>无</td><td colspan="3">基性斜长石为主</td><td>中性斜长石为主，少量钾长石</td><td>钾长石为主，少量斜长石</td><td>钾长石和斜长石含量不等</td><td>碱性长石和似长石</td></tr>
<tr><td colspan="3">铁、镁暗色矿物的种类及含量（%）</td><td>橄榄石>95</td><td>橄榄石75～95，辉石5～25</td><td>辉石>95</td><td>辉石、橄榄石等总含量为55～60</td><td>角闪石为主，黑云母、辉石次之，总含量为20～40</td><td>角闪石为主，黑云母、辉石次之，总含量<20</td><td>黑云母为主，角闪石和辉石次之，总含量<20</td><td>碱性角闪石、黑云母和辉石，总含量<20</td></tr>
<tr><td rowspan="5">岩石的产物及结构构造</td><td>深成岩</td><td>岩基岩株岩盆</td><td>粗、中、细粒结构块状条带状构造</td><td>纯橄榄岩</td><td>橄榄岩</td><td>辉石岩</td><td>辉长岩</td><td>闪长岩</td><td>正长岩</td><td>花岗岩、花岗闪长岩</td><td>霞石正长岩</td></tr>
<tr><td rowspan="3">浅成岩</td><td rowspan="2">岩墙岩脉岩床岩盖</td><td>中、细粒隐晶结构</td><td>金伯利岩</td><td></td><td></td><td>微晶辉长岩、辉绿岩</td><td>微晶闪长岩</td><td>微晶正长岩</td><td>微晶花岗岩</td><td></td></tr>
<tr><td>斑状结构</td><td></td><td></td><td></td><td>辉绿玢岩</td><td>闪长玢岩</td><td>正长斑岩</td><td>花岗斑岩、花岗闪长斑岩</td><td>霞石正长斑岩</td></tr>
<tr><td>岩脉</td><td>斑状结构、微晶、细晶、煌斑、伟晶结构</td><td></td><td colspan="3">煌斑岩</td><td></td><td colspan="3">细晶岩、伟晶岩</td></tr>
<tr><td>超浅成岩（次火山岩）</td><td>产状同侵入岩</td><td>结构特征介于喷出岩和浅成岩之间</td><td></td><td colspan="3">次辉绿岩、次玄武岩</td><td>次闪长玢岩、次安山岩</td><td>次正长斑岩、次粗面岩</td><td>次花岗闪长斑岩、次花岗斑岩、次流岩、次英安岩</td><td>次响岩</td></tr>
</table>

续表

岩石类型				超基性岩	基性岩	中性岩	酸性岩		碱性岩
				橄榄岩-苦橄玢岩类	辉长岩-玄武岩类	闪长岩-安山岩类	正长岩-粗面岩类	花岗岩-流纹岩类	霞石正长岩-响岩类
岩石的产物及结构构造	喷出岩	熔岩流、熔岩被、熔岩锥	斑状结构，气孔状、杏仁状、流纹状构造	苦橄玢岩	玄武岩、辉绿岩	安山岩	粗面岩	流纹岩、英安岩	响岩
			玻璃-隐晶质结构	火山玻璃岩（黑曜岩、松脂岩、珍珠岩、浮岩）					

沉积岩　在地壳演变过程中，地表或接近地表的常温、常压条件下，各类先成母岩的风化产物经搬运、沉积和成岩作用形成的岩石。按其成分和搬运、沉积方式不同，还可分碎屑岩、化学岩和生物岩。

（1）碎屑岩。已有岩石的风化碎屑，经机械方式搬运至异地沉积，压密固结、胶结成岩，占沉积岩的大部分。按碎屑物的粒径不同，有砾岩、砂岩、粉砂岩、泥岩、页岩等。碎屑岩的强度取决于成分和固结、胶结程度和胶结物的性质，如硅质、铁质、钙质胶结的岩石强度一般高或较高；泥质胶结的岩石强度就较低或低。砾岩、砂岩一般透水，可含水；粉砂岩、泥岩、页岩等一般不含水且隔水，可利用作为大坝的防渗依托；砂页（泥）岩互层时可出现承压含水层；泥页岩的顶部受层间错动和地下水积聚影响往往形成软弱夹泥层。

（2）化学岩。经化学作用溶解物质的溶液经搬运、富集后沉积形成，成岩作用以重结晶为主。按溶解物质的溶解度、浓度及温度、酸碱度的影响，化学沉积按氧化物→硅酸盐→碳酸盐→硫酸盐→卤化物次序沉积，占沉积岩的少部分，有石灰岩、石膏、岩盐等。化学岩具可溶性是其一大特点，可溶岩的岩溶化会造成水库、坝基的大量渗漏；岩层中的石膏成分的溶滤可削弱地基强度直至破坏。

（3）生物岩。生物作用形成或由生物残骸组成的岩石，在沉积岩中所占数量很少，有贝壳灰岩、生物灰岩、煤等。一般强度低。

沉积岩具有成层产出的特点，成分、结构各异（见表2），物理力学性质相差悬殊，各向异性明显。工程地质勘察中需要根据情况仔细研究。

变质岩　各种先成岩石由于物理化学条件的改变，其矿物成分、结构、构造等部分或全部发生变化，生成的与原岩完全不同的岩石，包括动力变质岩、热接触变质岩、区域变质岩、混合变质岩、交代变质岩5类。

由动力变质作用形成的岩石称动力变质岩。岩石在构造运动产生的定向压力下发生变形和破碎或轻微重结晶，如构造角砾岩、碎裂岩、糜棱岩、千糜岩、假熔岩等。

接触变质作用和热液交代变质作用是在岩浆岩体边缘和围岩接触带上，在岩浆高温和流体影响下，使岩石变质或伴有交代作用。由热接触变质作用形成的岩石称热接触变质岩，有角岩、大理岩等；由接触交代作用形成的岩石称接触交代变质岩，常见有矽卡岩。这类变质岩分布局限、规模不大。

地壳活动带伴随强烈造山运动所产生的一种大面积的区域性的变质作用称区域变质作用，所形成的变质岩称区域变质岩，常伴有混合岩化作用，影响因素复杂，混合岩化后称混合变质岩。岩石被强烈变质和片理化，具明显的板状、千枚状、片状和片麻状构造。多分布于结晶基底和造山带中，中国华北地块和塔里木地块的区域变质岩构成中国大陆的古老核心。

变质岩分类见表3。

表2　沉积岩分类表

岩类		物质来源	沉积作用	结构特征	岩石分类名称
碎屑岩类	沉积碎屑岩类	母岩机械破坏碎屑	机械沉积作用为主	沉积碎屑结构	1. 砾岩及角砾岩（粒径 $d>2$mm）； 2. 砂岩（$d=2\sim0.05$mm）； 3. 粉砂岩（$d=0.05\sim0.005$mm）
	火山碎屑岩类	火山喷发碎屑		火山碎屑结构	1. 集块岩（$d>100$mm）； 2. 火山角砾岩（$d=100\sim2$mm）； 3. 凝灰岩（$d=2\sim0.005$mm）
黏土岩类		母岩化学分解过程中形成的新生矿物——黏土矿物	机械沉积作用和胶体沉积作用	泥质结构	1. 黏土岩（$d<0.005$mm）； 2. 泥岩（$d<0.005$mm）； 3. 页岩（$d<0.005$mm）
化学和生物化学岩类		母岩化学分解过程中形成的可溶物质和胶体物质，生物作用产生	化学沉积作用和生物沉积作用为主	结晶结构 生物结构	1. 铝、铁、锰质岩； 2. 硅、磷质岩； 3. 碳酸盐岩； 4. 盐类岩； 5. 可燃有机岩

表 3 变质岩分类表

变质作用	变质岩类型	基本特征与成因	分布及影响范围
动力变质	动力变质岩类	由于构造应力作用，岩石破碎，矿物晶体内部结构发生改变，有时有新矿物产生	断裂带和强烈褶皱带
接触变质	接触变质岩类	由于岩浆侵入，围岩接触带受热力作用，矿物重结晶，没有物质成分加入或带出	侵入体附近一定范围
区域变质	区域变质岩类	高温高压作用下，岩石重结晶或变形，伴随有新化学成分加入，矿物成分和结构构造完全改变	区域性的分布范围广
混合岩化	混合岩类	在区域变质作用的基础上，深部热液和重熔熔浆，渗透、扩散，注入岩体中发生交代重结晶和流动变形等作用而成的岩石。常见残留基体和脉体以不同数量和形式混合为基本特点	区域变质强烈地区
交代变质	交代变质岩类	在气态或液态溶液影响下，由于交代作用使原岩发生蚀变	分布于裂隙矿床附近

变质岩除少数云母片岩、千枚岩等强度较低外，花岗片麻岩常是较好的地基岩体。在水电工程勘察中对变质岩需注意研究岩体的各向异性、风化带和软弱矿物富集带等，对论证坝基（肩）抗滑、防渗以及边坡、洞室围岩稳定问题十分重要。

yanshi bianpo

岩石边坡 (rock slope) 地壳表层一切具有侧向临空面的岩质地质体。岩石边坡有自然边坡和人工开挖边坡。在工程建设中，通常按岩性、岩体结构和变形形式等工程地质特征，对岩石边坡进行分类。岩石边坡失稳破坏的形式有剥落、滑动、崩塌、倾倒和蠕动等。影响岩石边坡稳定的因素有内在和外在两个方面。内在因素包括岩石的构成与特性、岩体结构特征、地应力状态、岩体中软弱面（带）的分布特征等，对边坡稳定起控制作用。外在因素包括风化作用、地表水和地下水活动、地震和人为作用等，与内在因素结合促使边坡变形的发生和发展。水电工程在建设和运行期间，一旦发生近坝库岸或坝区滑坡事故，其危害将是十分严重的。岩石边坡问题应从工程地质勘测、稳定分析、安全监测、加固处理等 4 个方面进行研究和处理。

工程地质勘测 了解边坡的地层、岩性、构造、水文地质和物理地质现象，查明边坡边界条件、可能变形破坏的形式，通过试验求取评价边坡稳定的参数，预测边坡变形破坏的规模和特征及其对工程的危害性，为工程设计提出处理建议。

稳定分析 分析方法有力学分析、图解分析和工程地质比拟 3 种。

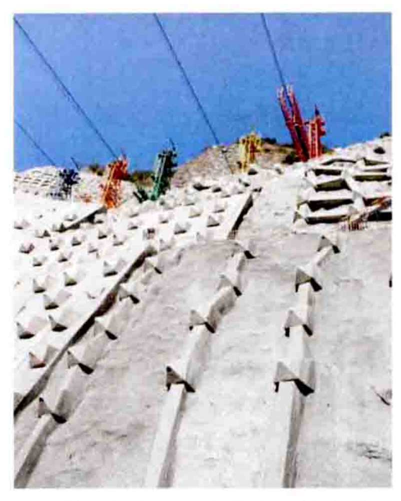
（1）力学分析。以岩石力学理论为基础，根据边坡边界条件和岩石物理力学参数，采用刚体极限平衡法、有限元法、离散元法和块体理论等进行边坡稳定计算。

（2）图解分析。包括求解边坡变形体边界条件和边坡稳定性两个方面。主要方法有 3 种：①以赤平极射投影原理为基础的实体比例投影图解；②根据岩体结构面的相互切割关系及边坡内滑动面倾角和其抗剪强度求变形体极限高度图解；③评价边坡稳定和预测变形体极限高度图解。

（3）工程地质比拟。应用自然历史分析方法认识和了解自然边坡的工程地质因素，用以与人工开挖边坡的工程地质因素作对比，提出相似条件下的边坡稳定系数。这种方法在生产实践中常被采用。

安全监测 通过设置在边坡表面或内部的观测仪器，如位移计、测斜仪、挠度计、水压力计以及地面标点等进行定期测量，监视边坡变形和地下水变化状况及其发展趋势，为安全预报及工程处理提供依据。此外，利用全球卫星定位系统（GPS）监测边坡变形的方法也得到了较快的发展。

加固处理 处理方法有：①挂网喷混凝土，清除表面风化岩石后做钢丝网喷混凝土层保护，防止岩石继续风化；②削坡压脚，提高边坡稳定性；③锚杆、锚索、锚筋桩、抗滑桩或挡墙加固；④对裂隙岩体固结灌浆；⑤设截水和排水系统，防止地表水渗入坡内，降低或消除地下水对边坡稳定的影响，见图。



锦屏一级水电站左岸高边坡支护

yanshi diji

岩石地基 (rock foundation) 位于建筑物基础下承受建筑物载荷的岩体。对坝、水闸等水工建筑物而言，在建筑物自重、水压、温度、动力、渗透力等载荷作用下，岩石地基的变形、抗滑稳定性、承载能力等都必须满足一定的安全要求，以保证建筑物的正常运行。

岩基变形 坝基岩体及拱坝坝头岩体在自重和外力作用下都要发生变形。由于岩体的非均匀性和各向异性以及地基中有断层、破碎带或软弱夹层等，通常易发生不均匀变形，从而引起坝体应力变化，过大的不均匀变形可能使坝体产生裂缝，甚至导致大坝失事。特别是拱坝，坝体应力状态受坝头岩体变形的影响更为敏感。用土力学中计算沉降的方法可以进行岩石比较均匀及边界条件简单的岩基变形计算。用有限元等数值分析方法进行岩基变形计算能够灵活处理复杂边界条件、岩体的不均匀性和断层、层面和软弱夹层等不连续面，并能考虑岩体的初始应力、复杂的岩体本构关系和地下水的渗透作用。

岩基抗滑稳定性 坝基滑动破坏有沿坝体与岩石之间的接触面滑动和岩体内部滑动两种基本类型。特别是对于层状岩体或岩体中有软弱夹层和缓倾角软弱结构面时，有出现沿

层面或软弱夹层滑动的可能性。对于混凝土重力坝，通常工程造价和安全取决于坝基抗滑稳定。对于混凝土拱坝，作用于坝面的大部分水推力都通过拱作用而传递给两岸坝头岩体，因此坝头岩体的稳定性至关重要。岩基抗滑稳定性可用刚体极限平衡理论估算，其安全度也可用有限元等数值分析方法估算。水库水在水头作用下向下游渗透，将增加岩基中可能滑动面上的渗透压力，从而降低坝基抗滑稳定性，计算中应予考虑。当前损伤力学、模糊数学和可靠度分析等理论已经在岩体稳定分析中得到广泛应用。

岩基承载力　在保证岩基应力水平和变形不超过允许值条件下岩基能够承受的最大载荷。岩基承载能力是决定坝体体型及尺寸、影响大坝安全和造价的重要因素，在坝工设计中要予以优化。

对于复杂地基，在基岩变形、抗滑稳定性、承载能力不满足要求时，需要对岩基进行加固处理，处理的原则和方法见岩基处理。

yanshi gongcheng shuzhi fenxi

岩石工程数值分析　(numerical analysis in rock engineering)　对岩石工程问题进行力学分析的数值方法。岩石工程主要包括地下工程和地面工程。地下工程包括隧道、地下采矿坑道、地下厂房（仓库）、人防工事、核废料储存等，需要进行围岩稳定、支护设计、开采方法、加固措施、防爆性能、防止渗漏等分析。地面工程包括桥梁基础、高层建筑及重大建筑物基础、坝基、铁路公路路基岩质边坡、运河、露天矿等，需要评价岩体稳定、分析加固措施及开采方法等。此外，在地震、石油、爆破等有关工程学科中，要研究岩体的断裂、动力作用、高温高压过程等。针对具体工程进行数值运算，得到各种课题的数值分析结果，据以对工程做出安全和经济评价，并确定设计方案和施工措施，是岩石工程数值分析的目的。现代计算机技术的发展，使过去无法用解析法求解的许多复杂工程问题，都可借助于数值运算求解，但计算结果的可靠程度取决于所采用的力学模型和参数。与以上工程领域相适应，岩石工程数值分析的范围也极为广泛，常用的有有限元法、边界元法、不连续介质力学分析法、反分析法等。

有限元法　将岩体离散为有限单元，通过虚功原理建立方程，将求解连续场函数的微分方程转化成求解有限个待定参数的代数方程问题。有限元法在求解弹塑性、流变、动力、非稳态渗流及其他与时效有关的问题，以及求解温度场、渗流场、应力场耦合问题等复杂的非线性问题中卓有成效，是岩石力学领域中应用最广泛的数值分析手段。

边界元法　将力学中微分方程的定解问题化为边界积分方程的定解问题，再通过边界的离散化与待定函数的分片插值求解的数值方法。其特点在于只在定义域的边界上划分单元，用满足控制方程的函数去逼近边界条件。具有数据处理工作量小、占计算机内存少、解题时间短等优点。但在处理多种介质问题、非匀质问题、复杂的非线性问题以及模拟分部开挖及施工处理过程等方面，不如有限元法方便和有效。

不连续介质力学分析法　将岩体作为不连续体的数值求解方法，包括离散元、非连续变形分析、流形元等分析方法。离散元法将含不连续面的岩体看作若干块刚体组成，块体之间靠角点作用力维持平衡。角点接触力用弹簧和黏性元件描述，并服从牛顿第二定律。当两块体接触时，按其互相嵌入深度计算接触作用力 F_n，$F_n = K_n\delta_n$。式中，K_n为接触弹性系数，δ_n为嵌入位移。当两块体为面接触时，假定它有两个点接触；若非面接触时，则认为只有一个点接触。然后按每个块体建立动量方程，并进行时间域的离散，从而求出块体的变形状态。离散元法在求解地下洞室围岩稳定及岩坡稳定时颇见效用。非连续变形分析（discontinuous deformation analysis，DDA）是以研究非连续块体系统不连续位移和变形为目的的一种数值方法。它将块体理论与岩土体的应力、应变分析相结合，在假定的位移模式下，由弹性理论位移变分法建立的总体平衡方程式，通过施加或去掉块体界面刚性弹簧，使得块体单元界面之间不存在嵌入和张拉现象，应用最小势能原理使整个系统的能量最小化，从而保证在静力和动力荷载下包含离散和不连续块体的地质系统大位移破坏分析得到唯一解。流形元是有限单元法（finite element method，FEM）与非连续变形分析方法的结合。流形元法在继承了非连续变形分析方法的接触和块体定义方法的基础上，引入数学流形分析中有限覆盖技术（包括物理覆盖和数学覆盖），设置了专门用于定义块体内部插值函数的数学网格。这样，流形元法不仅可以像非连续变形分析方法那样有效地模拟不连续面的接触和块体的运动，而且可以像有限元法那样精确地求解块体内部的应力分布，因此可以用来分析一般的变形问题、大变形问题、接触问题、块体运动问题等。

反分析法　岩石工程与一般土建工程不同之处在于岩体存在于地应力环境中，岩体力学参数与地应力及外力相关联。对岩石工程进行数值分析时，除了由外载荷和地应力的已知条件分析岩体应力变形状态的正向分析外，还可以按现场试验或监测结果推算岩石工程存在的地应力和岩石力学参数，即岩石工程的反分析数值法。反分析法利用回归分析、模态识别、系统优化等数值方法，进行数值分析，可以为岩石工程提出可靠的分析参数与赋存环境。

yanshi lixue

岩石力学　(rock mechanics)　研究岩石（体）的应力、变形和破坏规律以及岩石（体）的合理利用和加固处理的学科，是一门力学、工程学和地学相结合的交叉学科。以岩体为研究对象时也称为岩体力学。岩石按其成因不同而分为岩浆岩、沉积岩和变质岩 3 大类，是组成岩体的基本材料。工程岩体是在漫长的地质年代里形成的，由岩石块体和各种结构面组成的有特定结构、在人类工程活动影响范围内的那部分地质体。由于岩体具有明显的非均质、各向异性、非连续性，内部存在初始应力，且其性质随时间和赋存环境而变化，故远较其他材料复杂。在岩石（体）力学的研究中应充分考虑这些特点，采用基础理论和应用技术相结合的途径，建立能模拟岩体实际情况的实验和分析方法，重视原型观测和工程实录，以解决工程实际问题。

研究内容　现代岩石力学的研究范围已从单纯的岩石工程，扩展到地学、地震学、地球动力学、构造物理、震源力学等领域。岩石工程也深入到地下工程围岩、建筑物地基和岩石边坡、石油开采、核废料储存、水库地震等众多方面。

主要研究内容和应用领域有：

(1) 岩石力学的地质基础研究，如构造物理、不连续面特性、地应力场、渗流场、地温等。

(2) 天然岩石及其不连续面的力学特性及本构关系的研究。包括应力、应变、围压、时间、温度、相变等。

(3) 天然岩体的水理特性。包括渗透性、溶蚀性、崩解软化等。

(4) 天然岩体的动力特性。包括加载速率、黏滑、循环载荷、反复剪切、应力波传播规律等。

(5) 天然岩石的热学特性。包括低温岩洞贮藏天然气问题、高温岩石隧洞的设计与施工问题等。

(6) 岩石测试技术及监测技术研究。包括室内及现场试验、原型观测、施工监测等方面，要研究采用遥感遥测、高温高压、层析成像（CT）等新技术，研究施工安全监测与反馈信息在设计上的应用。

(7) 工程建设中的岩体稳定性问题。包括坝基、岩石边坡、地下洞室围岩等方面，研究数值分析方法及其在工程中的应用。

(8) 岩石力学的耦合分析。包括固体液体热的耦合分析，涉及水库地震、核电站的核废料处理、地热发电以及与地震有关的深部岩石特性的研究等课题。

(9) 天然岩体的充分利用及加固处理。包括在各类工程中充分利用围岩的自承能力，考虑衬砌结构与岩体的相互作用；岩石开挖过程中的支护工作；岩体的加固和防渗处理措施等。

(10) 工程实例的总结和反分析。包括对成功和发生事故的实际工程进行调查研究和反分析，评价工程安全性，并提高设计和施工水平。

(11) 岩石工程问题辅助决策的专家系统。

研究方法　主要研究方法有：

(1) 天然岩体地质条件的宏观分析。分析影响岩体稳定性的关键地质薄弱环节、地下水流及地应力状况、断裂构造及节理系统的产状及性质、各种物理地质现象等问题。

(2) 岩石力学性质的测试及资料的整理分析。必须在宏观地质分析的指导下选择试验和取样部位，设计试验项目和内容，揭露岩石的变形和破坏机理，确定力学模型及各项参数值。

(3) 特定条件下的物理模型试验。特别是地质力学模型试验及离心模型试验，把岩石力学试验上升到场的尺度范围，认识岩体的总体工作状态及破坏机制，验证分析方法的可靠性，并赖以建立新的分析方法并取得参数值。

(4) 岩石力学分析。包括解析法和数值法。详尽的地质分析是重要的一环，但地质因素仅提供了某种破坏的潜在可能性，工程载荷及边界条件等几何和力学的因素对破坏也起决定性的作用，施工方法和开挖程序对岩体稳定性也有影响。因此在一定地质条件下，要通过数学力学方法对岩体进行力学过程的分析，计算其应力、变形和破坏条件，以解决实际工程问题。

(5) 施工过程中的监测、监控及反馈分析。用于监控工程安全，验证工程设计是否合乎实际情况，并用信息反馈指导次一循环的设计和施工。

简史　岩石力学的发展可大致分为奠基时期和发展时期两个阶段。

(1) 奠基时期。在古代，天然岩石主要是用作建筑材料和矿石。世界上许多著名的古建筑都是用石料建造的。因为挑选坚硬新鲜的岩石切割成形，避开天然节理裂隙及风化的部分，其强度必有保证，所以对其力学特性的研究并不太迫切。岩石力学特性的研究最初是由采矿工程的需要而发展起来的。在20世纪初，由于矿山、水工、交通建设的需要，提出了地下洞室围岩稳定性、高坝岩基及岩质边坡稳定性等一系列课题。现代技术提供了岩石力学科学试验的手段，出现了岩石三轴试验、隧洞水压法和平板千斤顶法、原位岩体应力测量等测定岩石力学特性参数的技术。在这个阶段，岩石力学的研究领域多局限于山岩压力和矿坑支护方面，还习惯于单纯依靠岩石试件的试验室试验结果来评价天然岩体，在理论上常用连续介质力学作为解决各种岩石力学课题的基础。对于天然岩体的力学模型，既认为连续介质模型不适合于结构面切割的天然岩体，而对非连续介质模型又缺乏有效的研究手段。因此在这一阶段还不可能形成岩石力学的理论体系。

(2) 发展时期。20世纪60年代以来，由于工程建设的急速发展，提出的岩石力学问题的规模和难度都达到了新的水平。特别是1960年前后，法国的马尔巴塞（Malpasset）拱坝因坝基岩体破坏而失事；意大利的瓦依昂（Vajont）拱坝因库区山坡塌滑入水库中，使库水漫过坝顶造成下游生命财产的损失。这两次事故在工程界引起很大震动，从而更加重视岩石力学的研究工作。在这种背景下，国际岩石力学学会（International Society of Rock Mechanics，ISRM）于1962年在萨尔兹堡建立，并于1966年在葡萄牙的里斯本举行了第一届国际岩石力学大会。

在这一阶段，连续介质模型和非连续介质模型在争论中得到发展，并有互相结合的趋势。连续介质模型从整体着眼，认为岩体虽是断裂的，但只要宏观上具有确定的应力-应变关系，就可以用连续介质力学方法去求解其应力和变形状态。非连续介质模型的基本观点是岩体内部地质断裂系统对天然岩体工程性质的影响远大于岩石本身强度，岩体强度和变形及其各向异性都受岩体中块体单元间的相互联系及内部位移的制约，因此岩石力学应是不连续介质力学。不连续介质力学从岩体内部结构着眼，把天然岩体简化为某些不同性质和几何形状的块体的集合体，进而研究这些块体单元和不连续面的应力-应变关系和破坏机制，再去求解有关的岩石力学问题。不连续介质力学还有许多问题有待解决。由于电子计算机和数值方法的发展，以及对裂隙岩体的大量试验研究和理论分析，使连续介质力学也能在不同程度上考虑岩石中的不连续面，即对不均匀岩体中的不连续面以及被它们分隔的岩块分别用连续介质力学处理，然后用适当的相容条件将它们联系起来。在解决工程实际问题上，两者已经没有明显差别。

在这一时期对岩石力学发展和理论体系的形成有重大影响的因素有：①岩体赋存的地质背景对岩石工程的深刻影响逐步为人们所接受，并积累了大量软弱结构面及包含不连续面在内的地质单元工程特性的试验研究资料；②地球动力学、构造地质学、塑性力学、流变学、断裂力学、渗流力学等相关学科的不断渗入，使岩石力学的理论分析和研究内容日益丰富；③地震法、声波速度测定、声发射、刚性压力机、高温高压三轴仪以及现场应力及变形观测等新技术的应用，提高了对岩石性质的测试能力；④电子计算机的应用促使有限元、

边界元、离散元、块体理论、流形元等分析方法飞速发展，使岩石力学分析可以采用较为符合实际情况的模型和方法，提高分析成果的可靠性和工程设计的水平，并带动可靠度分析、模糊数学、损伤力学等新兴学科在岩石力学中的应用。

中国岩石力学起步较晚，但起点较高。从20世纪50年代开始，为适应工程建设的需要，建立了岩石力学与岩石工程学科。学科建立之初，研究的重点就放在了岩石的原位试验和原型监测方面，并和工程地质研究密切配合，结合重大水利水电、矿山、交通等工程的勘测、设计和施工进行了深入的研究，在岩体结构、块体理论、岩体应力、岩石流变、岩石断裂、裂隙渗流等方面取得了创造性的成就，如工程地质学家、构造地质学与地质力学家谷德振在工程地质力学方面所做出的突出贡献等。伴随着岩石力学与岩石工程的研究，中国的岩石力学试验技术和仪器设备也都陆续建立，并配套、配备了现代化的量测和数据处理设备。

参考书目

塔罗勃 J. 岩石力学. 林天健，等译. 北京：中国工业出版社，1965.

yanshi lixue xingzhi

岩石力学性质 (mechanical properties of rock)

岩石在各种受力状态和赋存环境下所表现出的变形和抵抗破坏的特性。岩石的变形包括蠕变和扩容，是评价岩体稳定性的重要依据。

力学性质 岩石在静态和动态下的力学性质通常包括抗压强度、抗拉强度、抗剪强度、弹性（变形）模量、泊松（S. D. Poisson）比和剪切模量、蠕变和扩容等，可以在试验室或现场用一定的仪器设备测定。它们都是岩石工程所必需的力学参数，对工程的安全性和经济性有重要影响。

岩石抗压强度 岩石在试验室或现场的无侧限条件下进行轴向压缩时所能承受的最大压应力。如以 P 代表破坏载荷，A 代表试件横断面积，则抗压强度 $R_c=P/A$。工程上常分别测定干燥和水饱和状态下的抗压强度，后者与前者之比值恒小于1，称为软化系数，该数值越小，表示岩石的抗水性越差。

岩石抗拉强度 岩石在单向拉伸时所能承受的最大拉应力。试验方法有直接法和间接法。前者与抗压强度试验类似，试验得出轴向拉伸的破坏载荷后，以公式 $R_t=P/A$ 计算抗拉强度 R_t。后者多用劈裂法，即以圆柱形试件在压力机上进行径向劈裂，得出破坏载荷 P，其计算式为 $R_t=2P/(\pi DL)$。式中 D 和 L 分别为试件的直径和长度。岩石的抗拉强度一般仅为其抗压强度的1/10。对于裂隙岩体，工程上通常认为其抗拉强度为零。

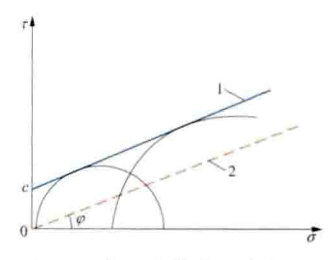


图1 岩石的抗剪强度包线
1—强度包线；2—残余强度

岩石抗剪强度 岩石抵抗剪切破坏的能力，即试件在二轴或三轴条件下剪切面上的极限剪应力。工程上多采用一组试件（3个以上）通过直剪或三轴试验来获得岩石抗剪强度包线，如图1所示。当抗剪强度 τ 与法向应力 σ 呈线性关系时，抗剪强度可用 $\tau=\sigma\tan\varphi+c$ 表达。式中 c 为垂直轴上的截距，称为黏聚力；φ 为强度包线的倾角，称为内摩擦角。岩石的三轴试验结果表明，其 τ、σ 关系并非线性，c、φ 值与应力状态有关。在岩石力学分析中按剪切过程又将抗剪强度分为峰值强度和残余强度，前者为最大剪切强度，后者是岩石大变形后的最小剪切强度，见图1。工程是长期承载的，往往还要考虑岩石的长期强度。对有软弱面存在的岩石，常以该软弱面为剪切面，进行直剪试验求出其抗剪强度。

岩石弹性模量和变形模量 在单轴受力下岩石轴向应力 σ_i 与轴向应变 ε_i 之比。当岩石的应力-应变曲线为直线关系时，以模量 $E=\sigma_i/\varepsilon_i$ 表示。若加载和卸载时变形路径相同，则岩石呈弹性性质，称 E 为弹性模量；如果加载与卸载时的变形路径不同，出现滞后环，如图2中线1和线2所示，则将出现永久变形 ε_0，并可分为加载模量（图2中线1）和卸载模量（图2中线3）。通常根据一次卸载曲线的割线（图2中线2）来确定弹性模量。如果采取一次加载的全变形 ε_i 来计算模量，则称其为变形模量。

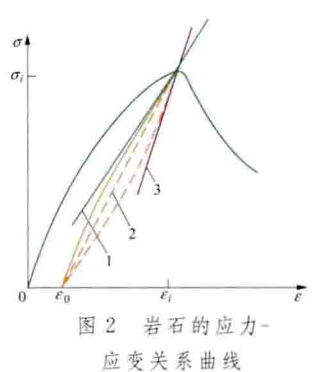


图2 岩石的应力-应变关系曲线
1—加载模量线；2—卸载割线；3—卸载模量线；ε_0—永久变形

岩石泊松比 单轴应力下所引起的侧向应变与轴向应变之比，或称泊松系数。该系数小于0.5。它与岩石弹性（变形）模量是岩石工程应力分析中不可少的两个参数，常常通过测定岩石的波速来求出这两个参数。

岩石剪切模量 剪切应力与剪切位移曲线上的一个参数，以 $G=\tau/\gamma$ 来表达。式中，τ 为剪应力，γ 为单位剪切位移。它与弹性模量和泊松比有关。在各向异性岩石工程的数值计算中往往需要此参数。

蠕变和扩容 在恒定应力条件下，岩石的变形随时间而变化的现象称为蠕变。在加荷条件下，岩石内因微裂隙扩张而引起的体积增大现象称为扩容。不同岩石变形表现不一，各种坚硬岩石（如花岗岩）往往蠕变量很小，工程上一般可不考虑，但要重视其扩容问题；而各种软弱岩石（如黏土岩），其蠕变量一般较大，蠕变问题必须加以考虑。

影响岩石力学性质的因素 主要有岩石的成因和组成（如矿物成分、结晶情况、颗粒大小、孔隙率、胶结情况）、湿度和温度、各向异性、试件形状及尺寸、不连续面发育程度和性质等。

（1）成因及组成。组成岩石的矿物本身强度越大，岩石的强度和模量越高。通常岩浆岩强度最高，E 值最大。细粒岩浆岩的强度比粗粒岩浆岩高。孔隙率大和风化严重的岩石强度和模量较小。沉积岩的强度和 E 值较低，且与其胶结情况有关，如硅质胶结的岩石强度和模量较高，钙质胶结次之，泥质胶结最差。

（2）湿度与温度。各类岩石的强度均随温度和湿度增高而降低，尤其是泥质岩石（黏土岩、页岩等）受水浸润会发生软化而丧失其强度，模量值一般亦随温度升高而降低。

（3）各向异性。岩石的强度和变形性质多具有明显的各

向异性，它主要取决于岩石的层理（或片理）和节理分布。一般当力与层理或节理面平行时，其抗压强度高，抗剪强度较低，模量最大；力与层理或节理面垂直时，则相反。

（4）试件形状及尺寸。圆柱体试件强度小于立方体试件强度，且试件高径比越大，其强度越低。

（5）不连续面状况。岩体的强度与变形往往取决于裂隙等不连续面出现的频率及其性质（连续性和充填情况和走向问题），它与小试件的试验结果常有显著差别，因此，工程上多重视进行现场岩石试验（见岩体力学性质现场试验）。

参考书目

耶格 J C，库克 N G W. 岩石力学基础. 中国科学院工程力学所，译. 北京：科学出版社，1981.

yanshi lixue xingzhi shinei shiyan

岩石力学性质室内试验 (laboratory test for mechanical properties of rock)

在实验室内对岩石样品的变形、强度、流变性质的测试和试验。通常包括单轴抗压强度试验、劈裂法抗拉强度试验、轴向拉伸法抗拉强度试验、单轴压缩变形试验、直剪试验、点荷载强度试验等。其中点荷载强度也可在现场进行。试验结束后应及时编写试验报告，报告内容包括试验要求、试验过程、成果数据、结论等。对样品加工或试验破坏异常成果数据的情况应予以说明。

单轴压缩变形试验　采用电阻应变片法或千分表法。①电阻应变片法。电阻应变片选择时，应变片阻栅长度应大于岩石最大矿物颗粒直径的10倍，并应小于试件半径；同一试件所选定的工作片与补偿片的规格、灵敏系数等应相同。贴片位置应选择在试件中部相互垂直的两对称部位，以相对面为一组，分别粘贴轴向、径向应变片。测初始读数，加载采用一次连续加载法。以0.5～1.0MPa/s的速率加载，逐级测读载荷与各应变片应变值直至试件破坏。②千分表法。千分表架固定在试件预定的标距上，在表架上的对称部位分别安装量测试件轴向或径向变形的千分表测初始读数，加载采用一次连续加载法。以0.5～1.0MPa/s的速率加载，逐级测读载荷与各应变片应变值直至试件破坏。

单轴抗压强度试验　测试岩石试件在无侧限条件下受轴向压力作用时单位面积所承受的荷载。试件可用钻孔岩心或岩块制取，试件含水状态可根据需要选择天然含水状态、烘干状态、饱和状态或其他含水状态。

劈裂法抗拉强度试验　试件可用钻孔岩心或岩块制取。根据要求的劈裂方向，通过试件直径的两端，沿轴线方向画两条相互平行的加载基线，将2根垫条沿加载基线固定。以0.3～0.5MPa/s的速率加载直至破坏。软质岩宜适当降低加载速率。

轴向拉伸法抗拉强度试验　试件可用钻孔岩心或岩块制取。选择适用于试件烘干状态或含水状态的高强度黏结胶，将黏结胶均匀地涂在试件与夹具的面上，使试件与夹具保持在同一轴线上，施加压力，使结合紧密，根据黏结胶要求进行养护。以0.3～0.5MPa/s的速率加载直至破坏。软质岩宜适当降低加载速率。

直剪试验　包括岩石、岩石结构面以及混凝土与岩石接触面直剪试验。采用平推法。将试件置于直剪仪的剪切盒内，试件与剪切盒内壁的间隙用填料填实，使其成为一整体。预定剪切面应位于剪切缝中部。在每个试件上分别施加不同的法向载荷，在试件法向应力施加固结稳定后，再按预估最大剪切载荷宜分8～12级施加剪切载荷，直至测出趋于稳定的剪切载荷值为止。根据剪应力与位移关系曲线，确定相应的抗剪强度参数。

点荷载强度试验　试件可采用钻孔岩心或从岩石露头、勘探坑槽和洞室中采取的岩块。试件在采取和制备过程中，应避免产生裂缝。试件可根据需要选择天然含水状态、烘干状态、饱水状态和其他含水状态。

作径向试验的岩心试件，长度与直径之比应大于1.0；作轴向试验的岩心试件，长度与直径之比宜为0.3～1.0，方块体或不规则块体试件，其尺寸宜为（50±35）mm，两加载点间距与加载处平均宽度之比宜为0.3～1.0。试验时，稳定地施加载荷，使试件在10～60s内破坏，记录破坏载荷。资料分析整理应进行等效岩心直径的换算后，再计算岩石点荷载强度指数。

Yantan Shuidianzhan

岩滩水电站 (Yantan Hydropower Station)

位于中国红水河中游广西大化瑶族自治县境内，距南宁市170km。电站开发任务以发电为主，兼有航运效益，见图1。电站一期工程装机容量1210MW，多年平均年发电量56.6亿kW·h；扩建工程装机容量600MW。总装机容量1810MW，多年平均年发电量75.47亿kW·h。用500kV高压输电线路供电给广西和广东。



图1　岩滩水电站

水文和水库特性　坝址上游控制流域面积106 580km²。多年平均流量1770m³/s，多年平均年径流量559亿m³。工程按1000年一遇洪水30 500m³/s设计，5000年一遇洪水34 800m³/s校核。设计洪水位227.20m，相应库容33.5亿m³；正常蓄水位223.00m，相应库容26.0亿m³；水库死水位204.00m，相应死库容10.4亿m³，调节库容15.7亿m³，汛期运行水位219.00m，为季调节水库。上游龙滩水电站投入后，非汛期水库最低运行水位219.00m，相应调节库容4.3亿m³，汛期日调节最低运行水位218.50m，相应调节库容0.47亿m³。

工程地质条件　水库地处相对稳定块，地震基本烈度为Ⅵ度。坝址区地层为岩浆岩，坝基主要为粗晶菊花状辉长辉绿岩，岩石坚硬质密、力学强度高，未发现大的断裂构造，地质条件良好。

枢纽布置　枢纽工程由大坝、泄水建筑物、厂房、通航建筑物等组成，见图2。

大坝　部分为混凝土重力坝，部分为碾压混凝土坝。坝

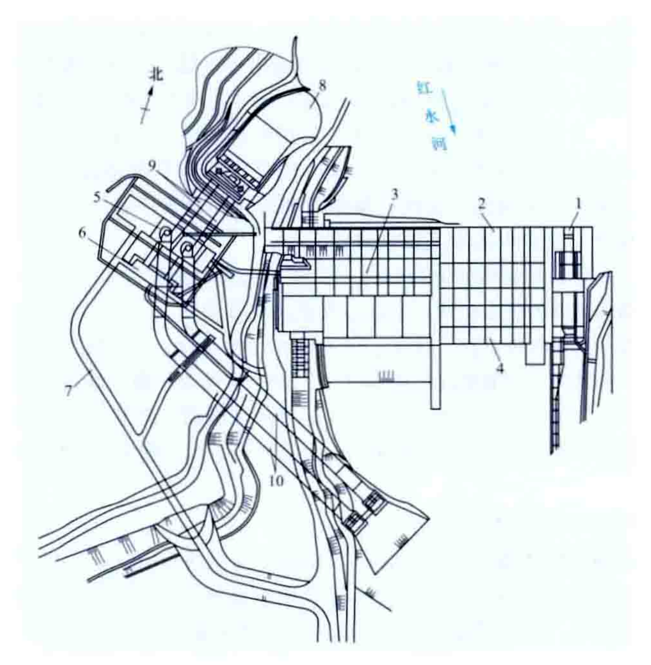


图 2 岩滩水电站枢纽平面布置图

1—升船机；2—溢流坝；3—一期厂房；4—消力戽；5—地下厂房；6—主变压器室；7—进厂交通洞；8—引水明渠；9—引水隧洞；10—尾水隧洞

顶高程 233.00m，最大坝高 110m，坝顶长 525m、宽 22m。

泄水建筑物 溢流坝段设 15m×22.5m（宽×高）的表孔 7 孔，堰顶高程 202.00m，采用宽尾墩与戽式消力池联合消能。设置 5m×9.556m（宽×高）底孔 1 个，进口底坎高程 176.00m，采用挑流消能。

厂房 一期工程厂房位于右岸坝后，安装 4 台 302.5MW 机组。水轮机为混流式，转轮直径 8.0m，最大水头 68.5m，最小水头 37m，额定水头 59.4m，额定转速 75r/min，额定出力 307.1MW，最高效率 94.44%，额定工况点效率 92.9%。发电机为空冷半伞式，额定电压 15.75kV，额定容量 345.7MV·A，额定效率 98.51%，额定功率因数 0.875。引水钢管直径 10.8m。高压配电装置采用气体绝缘金属封闭电器。电站以 3 回 500kV 和 2 回 220kV 高压出线接入广西和广东电网。

扩建工程厂房位于右岸地下，安装 2 台 300MW 机组。水轮机为混流式，转轮直径 8.1m，最大水头 68.5m，最小水头 37m，额定水头 57.4m，额定转速 71.4r/min，额定出力 306.1MW，最高效率 94.86%，额定工况点效率 90.80%。

通航建筑物 设于溢流坝左侧，采用钢丝绳卷扬、部分平衡、船厢下水型垂直升船机，过船吨位 250t，年货运量 180 万 t，并预留远景 500t 通航能力的位置。

工程施工 采用左岸明渠导流、大基坑全年施工方案。一期工程于 1984 年 1 月开始筹建，1992 年 9 月第一台机组发电，1995 年 6 月 4 台机组全部投入运行。扩建工程于 2010 年 10 月 1 日开工建设，2013 年 12 月 31 日首台机组投产。

主要工程量：一期工程量为土方明挖 338 万 m^3，石方明挖 676 万 m^3，混凝土 342 万 m^3，金属结构安装 21 000t。扩建工程工程量为土方明挖 38 万 m^3，石方明挖 81 万 m^3，石方洞挖 67 万 m^3，混凝土 21 万 m^3，金属结构安装 2930t，帷幕灌浆 2.3 万 m，固结灌浆 4.3 万 m。

设计单位 广西电力工业勘察设计研究院。

yanti

岩体 (rock mass)

在地质历史过程中形成的、具有一定结构的原位岩石综合体。岩体在形成过程中，经受了构造变动、风化、卸荷等各种内外地质作用，主要由岩块和结构面组成，此外还包括后期侵入的岩脉、结晶体、钙华与充填于孔隙中的水、空气等。其中，岩块是被结构面切割后形成的岩石块体。结构面是各种不同成因、不同特征的地质界面，如断层、节理、层理、软弱夹层及不整合面等。按结构面地质成因分为原生结构面、构造结构面及次生结构面，按力学成因分为张性结构面、剪性结构面。在岩体中，结构面决定着岩体的结构特征和力学特征。岩体具有非均质、各向异性、不连续、蠕变等工程特性。岩体赋存于复杂的天然应力场和地下水等环境中。天然应力场包括自重应力场、构造应力场、温度应力场、结晶应力场等。

岩体及其赋存环境条件控制着其变形和破坏的基本规律或本构关系，影响和决定岩体的基本物理力学性能和力学作用。在水电工程地质勘察中，对各种建筑物地基、边坡及围岩岩体，既要查明岩石的岩性、基本组成、结构与构造，又要查明岩体结构和工程特性，通常要求除室内试验而外在现场模拟建筑物运行工况进行加载、压水等现场试验，了解岩体的强度、抗变形和抗渗等能力，合理确定地基岩体的各种物理和力学指标，使大坝等建筑物工程设计和地基处理做到可靠、安全、经济。

yanti fenghua

岩体风化 (weathering of rock mass)

在自然条件下，地表岩体遭受太阳、水、空气和生物等作用而发生的物理性质和化学性质的变化。岩体风化以后，强度降低，完整性变差。岩体风化是普遍现象，但在某些地带或特定条件下风化带保存并不一定完全，有的地段只保存了强风化或弱风化带以下岩体。另外，有些工程出于设计需要重点对某风化带作详细分带研究，可根据带内岩石风化差异进一步分为上、下亚带或上、中、下亚带，如弱风化下亚带等。

岩体风化作用 可以分为物理风化作用、化学风化作用和生物风化作用。

物理风化作用 岩体受气温变化、冻融和盐类结晶等作用而产生的机械破碎。物理风化基本不改变岩石的化学成分，但为化学风化作用的深入发展创造了有利条件。

化学风化作用 岩石与水、氧、二氧化碳以及各种酸类发生化学反应所引起的岩石和矿物的化学成分的变化，并可形成新的矿物。

生物风化作用 岩体在生物活动的影响下，所引起的破坏作用。如植物根的生长使岩体遭受机械破坏；生物腐烂和微生物作用使岩体产生化学分解。

岩体风化形态 按风化岩块的形状可分为碎块状风化和球状风化；按风化岩体的产状又可分为表层均匀风化、带状（或层状）风化和囊状风化等。

碎块状风化 风化营力沿多组裂隙侵入，使岩体风化成碎块或碎片状。

球状风化 等粒状岩体、厚层或块状岩体被裂隙切割成立方体，风化营力使立方体棱角碎裂消失，由表往里，层层剥离后形成球形。

表层均匀风化 在构造、岩性均匀地区，风化营力沿均匀分布的裂隙侵入，使地表相同深度处岩体的风化程度相接近。

带状风化　构造、岩性不均匀地区，岩体抗风化能力不等，风化作用沿易风化的岩层、断层带或岩脉进行，风化岩体呈层状或带状分布，也有称此为差异性风化。

囊状风化　风化作用沿两条或两条以上断层或节理密集带交汇处进行，风化岩体呈囊状分布。

岩体风化分带　根据岩体风化程度可分为全风化、强风化、弱风化（中等风化）、微风化、新鲜等5个带。

全风化　母岩的组织结构已完全破坏，仅外观保持原岩状态，矿物成分除石英外，大部分风化变质，颜色已全部改变，光泽消失，锤击呈哑声，浸水崩解，物理力学特性与土体近似。

强风化　外观具原岩组织结构，但裂隙发育，岩体呈干砌块石状，岩块上裂纹密布，疏松易碎，易风化矿物均已变质，其他矿物仍有部分保持原矿物特征，锤击呈哑声，物理力学性质显著变差，变形模量小，抗剪强度低。

弱风化　又称中等风化。岩体组织结构大部完好。但节理面风化明显，出现次生、风化矿物，沿节理面大部改变颜色，但岩块中部仍保持新鲜岩石特点。锤击发声不够清脆，物理力学性质有所降低。

微风化　组织结构未变，除构造节理外，一般风化裂隙不易察觉，沿节理面有时有铁锰质渲染，节理面略有变色，锤击发声清脆，物理性质基本不变，力学强度略有降低。

新鲜　保持新鲜色泽，仅大的裂隙面偶见褪色，裂隙面紧密，完整或焊接状充填，仅个别裂隙面有锈膜浸染或轻微蚀变，锤击发音清脆，开挖需要爆破。

yanti gongcheng fenlei

岩体工程分类

（engineering geological classification of rock mass）　以岩体的强度、完整性、结构面性状、地下水状态、地应力等为因素，结合建筑物地基、洞室围岩稳定及施工特点进行分析，作出的质量分级或分类评价。自Ritter（1879）谋求将经验方法公式化用于隧洞设计，尤其是确定支护形式开始，岩体分类系统的发展已有100多年的历史。20世纪70年代以后，工程岩体分类方法研究取得显著进展。受建筑物受力、运行工况差异及行业习惯影响，工程岩体分类方法有多种。国际上代表性的岩体分类方法有：K. 太沙基（K. Terzaghi，1946）岩体分类，C. 威克汉姆（C. Wickham，1972）等RSR岩体结构等级分类，Z. T. 宾尼奥斯（Z. T. Bieniawski，1973）RMR岩体力学等级分类，N. 巴顿（N. Barton，1974）岩体掘进质量指标——Q系统分类等。中国于20世纪70年代起相继在水利水电、铁道、交通等行业或部门开展工程岩体分类方法研究并提出了一些围岩分类方法并应用于实例工程，1994年颁布GB 5018—1994《工程岩体分级标准》。中国在岩土工程、铁道、交通、水电、水利、冶金等行业或部门均有结合自身工程特点的岩体质量分级或分类方法，且多采用5级制的等级划分。

中国水电工程常用的分类方法有坝基岩体工程地质分类、围岩工程地质分类、边坡岩体质量分级等。

坝基岩体工程地质分类　主要依据岩石坚硬程度、岩体结构类型、结构面发育与性状等划分，见表1。

表1　坝基岩体工程地质分类

岩体基本质量	A坚硬岩（$R_b>60$MPa）		B中硬岩（$R_b=60\sim30$MPa）		C软质岩（$R_b<30$MPa）	
	岩体特征	岩体工程性质评价	岩体特征	岩体工程性质评价	岩体特征	岩体工程性质评价
Ⅰ	$Ⅰ_A$：岩体呈整体状或块状、巨厚层状、厚层状结构，结构面不发育至轻度发育，延展性差，多闭合，各向同性力学特征	岩体完整，强度高，抗滑、抗变形性能强，不需作专门性地基处理。属优良高混凝土坝地基				
Ⅱ	$Ⅱ_A$：岩体呈块状或次块状、厚层结构，结构面中等发育，软弱结构面分布不多，或不存在影响坝基或坝肩稳定的楔体或棱体	岩体较完整，强度高，软结构面不控制岩体稳定，抗滑抗变形性能较高，专门性地基处理工作量不大，属良好高混凝土坝地	$Ⅱ_B$：岩体结构特征同$Ⅰ_A$，具各向同性力学特性	岩体完整，强度较高，抗滑、抗变形性能较强，专门性地基处理工作量不大，属良好高混凝土坝地基		
Ⅲ	$Ⅲ_{1A}$：岩体呈次块状或中厚层状结构，结构面中等发育，岩体中分布有缓倾角或陡倾角（坝肩）的软弱结构面或存在影响坝基或坝肩稳定的楔体或棱体	岩体较完整，局部完整性差，强度较高，抗滑、抗变形性能在一定程度上受结构面控制。对影响岩体变形和稳定的结构面应作专门处理	$Ⅲ_{1B}$：岩体结构特征基本同$Ⅱ_A$	岩体较完整，有一定强度，抗滑、抗变形性能受结构面和岩石强度控制	$Ⅲ_C$：岩石强度大于15MPa，岩体呈整体状或巨厚层状结构，结构面不发育—中等发育，岩体具各向同性力学特性	岩体完整，抗滑、抗变形性能受岩石强度控制
	$Ⅲ_{2A}$：岩体呈互层状或镶嵌碎裂结构，结构面发育，但贯穿性结构面不多见，结构面延展差，多闭合，岩块间嵌合力较好	岩体完整性差，强度仍较高，抗滑、抗变形性能受结构面和岩块间嵌合能力以及结构面抗剪强度特性控制，对结构面应做专门性处理	$Ⅲ_{2B}$：岩体呈次块或中厚层状结构，结构面中等发育，多闭合，岩块间嵌合力较好，贯穿性结构面不多见	岩体较完整，局部完整性差，抗滑抗变形性能在一定程度上受结构面和岩石强度控制		

续表

岩体基本质量	A 坚硬岩（R_b>60MPa）		B 中硬岩（R_b=60～30MPa）		C 软质岩（R_b<30MPa）	
	岩体特征	岩体工程性质评价	岩体特征	岩体工程性质评价	岩体特征	岩体工程性质评价
Ⅳ	Ⅳ$_{1A}$：岩体呈互层状或薄层状结构，结构面较发育—发育，明显存在不利于坝基及坝肩稳定的软弱结构面、楔体或棱体	岩体完整性差，抗滑、抗变形性能明显受结构面和岩块间嵌合能力控制。能否作为高混凝土坝地基，视处理效果而定	Ⅳ$_{1B}$：岩体呈互层状或薄层状、存在不利于坝基（肩）稳定的软弱结构面、楔体或棱体	同Ⅳ$_{1A}$	Ⅳ$_C$：岩石强度大于15MPa，结构面发育或岩体强度小于15MPa，结构面中等发育	岩体较完整，强度低，抗滑、抗变形性能差，不宜作为高混凝土坝地基。当局部存在该类岩体，需专门处理
Ⅳ	Ⅳ$_{2A}$：岩体呈碎裂结构，结构面很发育，且多张开，夹碎屑和泥，岩块间嵌合力弱	岩体较破碎，抗滑、抗变形性能差，不宜作高混凝土坝地基。当局部存在该类岩体，需作专门性处理	Ⅳ$_{2B}$：岩体呈薄层状或碎裂状，结构面发育—很发育，多张开，岩块间嵌合力差	同Ⅳ$_{2A}$		
Ⅴ	Ⅴ$_A$：岩体呈散体状结构，由岩块夹泥或泥包岩块组成，具松散连续介质特征	岩体破碎，不能作为高混凝土坝地基。当坝基局部地段分布该类岩体，需作专门性处理	同Ⅴ$_A$	同Ⅴ$_A$	同Ⅴ$_A$	同Ⅴ$_A$

注：本分类适用于高度大于70m的混凝土坝。R_b为岩石饱和单轴抗压强度。

围岩工程地质分类　水电工程地下洞室围岩分类，以岩石坚硬程度、岩体结构类型、完整程度、地下水、围岩强度应力比（岩体强度与最大主应力比）为基础，适当考虑洞室跨度影响进行划分，见表2。其又分初步分类和详细分类，要依勘察工作的深度和精度而定。

表2　围岩工程地质分类

围岩类别	围岩稳定性评价	支护类型
Ⅰ	稳定。围岩可长期稳定，一般无不稳定块体	不支护或局部锚杆或喷薄层混凝土。大跨度时，喷混凝土，系统锚杆加钢筋网
Ⅱ	基本稳定。围岩整体稳定，不会产生塑性变形，局部可能产生组合块体失稳	
Ⅲ	局部稳定性差。围岩强度不足局部会产生塑性变形，不支护可能产生塌方或变形破坏。完整的较软岩，可能短时稳定	喷混凝土，系统锚杆加钢筋网。大跨度时，并加强柔性或刚性支护
Ⅳ	不稳定。围岩自稳时间很短，规模较大的各种变形和破坏都可能发生	喷混凝土，系统锚杆加钢筋网，并加强柔性或刚性支护，或浇筑混凝土衬砌
Ⅴ	极不稳定。围岩不能自稳，变形破坏严重	

注：大跨度地下洞室指跨度大于20m的地下洞室。

边坡岩体质量分级　水电工程边坡分类以岩石单轴饱和抗压强度和岩体完整性系数为基本指标，计算基本质量指标 BQ 值，并根据 BQ 值对边坡岩体质量进行划分，见表3。

表3　边坡岩体基本质量分级

基本质量级别	岩体基本质量的定性特征	岩体基本质量指标（BQ）
Ⅰ	坚硬岩，岩体完整	>550
Ⅱ	坚硬岩，岩体较完整；较坚硬岩，岩体完整	550～451
Ⅲ	坚硬岩，岩体较破碎； 较坚硬岩或软硬岩互层，岩体较完整； 较软岩，岩体完整	450～351
Ⅳ	坚硬岩，岩体破碎； 较坚硬岩，岩体较破碎～破碎； 较软岩或软硬岩互层，且以软岩为主，岩体较完整～较破碎； 软岩，岩体完整～较完整	350～251
Ⅴ	较软岩，岩体破碎； 软岩，岩体较破碎～破碎； 全部极软岩及全部极破碎岩	≤250

注：$BQ=90+3R_c+250K_v$，R_c为岩石单轴饱和抗压强度；K_v为完整性系数。限制条件：①当 $R_c>90K_v+30$ 时，R_c取 $90K_v+30$；②当 $K_v>0.04R_c+0.4$ 时，K_v取 $0.04R_c+0.4$。岩体完整性指数按式 $K_v=(v_{pm}/v_{pr})^2$ 计算，其中 v_{pm}为岩体纵波速度，m/s；v_{pr}为岩块纵波速度，m/s。

yanti jiegou

岩体结构　(structure of rock mass)　岩体中结构面与结构体的组合形式。结构面是指层理、片理、断层、节理等各类破裂面，结构体指各类结构面切割形成的岩块。主

要有整体块状结构、层状结构、镶嵌结构、碎裂结构、散体结构等五大类。岩体结构分类属定性分类。在水电工程分析评价中应根据建筑物的种类、形式、规模，结合岩体的岩石强度、结构面特征及其力学参数，以及各种结构面的组合关系，岩体受力状态进行分析计算。有时还需辅以地质力学模型试验和原位监测进行论证。

整体块状结构　根据岩体的完整程度又可分为整体状结构、块状结构及次块状结构。①整体状结构。岩体完整，呈巨块状，结构面不发育，间距大于1m。②块状结构。岩体较完整，呈块状，结构面轻度发育，间距为0.5～1m。③次块状结构，岩体较完整，呈次块状，结构面中等发育，间距为0.3～0.5m。

层状结构　根据岩层厚度又可分为巨厚层状结构、厚层状结构、中厚状结构、互层状结构和薄层状结构。①巨厚层状结构。岩体完整，呈巨厚层状，结构面不发育，间距大于1m。②厚层状结构。岩体较完整，呈厚层状，结构面轻度发育，间距为0.5～1m。③中厚层状结构。岩体较完整，呈中厚层状，结构面中等发育，间距为0.3～0.5m。④互层状结构。岩体较完整或完整性差，呈互层状，结构面较发育或发育，间距为0.1～0.3m。⑤薄层状结构。岩体完整性差，呈薄层状，结构面发育，间距小于0.1m。

镶嵌结构　岩体完整性差，岩块嵌合紧密到较紧密，结构面较发育到发育，间距一般为0.1～0.3m。

碎裂结构　根据碎裂程度又分为块裂结构和碎裂结构。①块裂结构。岩体完整性差，岩块间有岩屑和泥质物充填，嵌合中等紧密至较松弛，结构面较发育到发育，间距一般为0.1～0.3m。②碎裂结构。岩体较破碎，岩块间有岩屑和泥质物充填，嵌合较松弛至松弛，结构面很发育，间距一般小于0.1m。

散体结构　根据粒径大小分为碎块状结构和碎屑状结构。①碎块状结构。岩体破碎，岩块夹岩屑或泥质物，嵌合松弛。②碎屑状结构。岩体极破碎，岩屑或泥质物夹岩块，嵌合松弛。

yanti lixue xingzhi xianchang shiyan

岩体力学性质现场试验　(in-situ test for mechanical properties of rock mass)　在现场的试验洞、基坑或钻孔中测定岩体强度、变形、地应力、声波的试验技术。是测定岩体和结构面力学性质的基本方法，也是研究岩石工程稳定性分析评价和加固设计的基础，包括岩体强度试验、岩体变形试验、地应力试验及岩体波速测试。

岩体强度试验　包括直剪试验、三轴试验、载荷试验。①直剪试验。测定岩体中软弱结构面（包括裂隙面、层面、断层破碎带）、岩体本身以及混凝土与岩体接触面的抗剪强度。试体剪切面积不小于2500cm^2，边长不小于50cm，试体高度应大于推力方向边长的1/2。每组试验试体数量为5个，在不同法向应力下进行试验。根据试验结果绘制各法向应力下的剪应力与剪切位移及法向位移关系曲线，根据关系曲线确定各法向应力的抗剪断峰值和抗剪值；绘制各法向应力及与其对应的抗剪断峰值和抗剪值关系曲线，按库伦表达式确定相应的抗剪强度参数；在剪应力与位移曲线上确定其他剪切阶段特征点，确定相应的抗剪强度参数。②三轴试验。测定在等侧向围压下岩体在轴向压力作用下抵抗破坏的能力。试体采用方柱形，边长不应小于30cm，高度与边长之比宜为2.0～2.5，底部不切开，用千斤顶或液压枕加轴向力直至破坏，每组试验试体数量不少于5个，在不同侧压状态下测定岩体轴向应力下的强度参数。③载荷试验。刚性承压板法浅层静力载荷试验，宜与刚性承压板法岩体变形试验结合进行，采用一次逐级连续加载的方式施加荷载，按分级稳定标准控制各级压力，达到试验终止条件即可终止试验。根据试验结果绘制压力与变形关系曲线，确定各变形阶段特征点。

岩体变形试验　试验方法有承压板法、狭缝法、双（单）轴压缩法、钻孔径向加压法、径向液压枕法、水压法。①承压板法。通过刚性承压板施力于岩体表面，测量岩体变形，测定岩体变形特性指标的方法。承压板面积不宜小于2000cm^2，刚性承压板必须有足够的刚度，用千斤顶或液压枕向岩体逐级加荷，同时用百分表、千分表或位移计测量压缩变形。根据试验结果绘制压力与变形关系曲线，计算变形模量指标。②狭缝法。又称刻槽法，是在岩体表面刻槽，槽内安装扁千斤顶（压力枕）对狭缝两侧岩体施加压力测定岩体变形特性指标。试验时，利用油泵和扁千斤顶对槽壁岩体分级施加法向压力，同时利用百分表测记相应压力下的变形值，狭缝内加压面积不宜小于1500cm^2，加压长度不宜小于50cm，加压宽度不宜小于30cm，宽长比宜为0.6～1.0。③双（单）轴压缩法。试体四周狭缝尺寸与狭缝法一样，测试时采用双轴或单轴方向加压，在岩体加压受力方向和垂直方向安装变形位移测表，轴向压力施加同时测定变形。④钻孔径向加压法。在岩体钻孔中一定长度内对孔壁施加压力，测量孔壁的径向变形，测定岩体变形特性指标。⑤径向液压枕法。利用围岩表面的压力与变形成正比关系，测定地下洞室围岩岩体抗力系数或单位抗力系数。岩体抗力系数是围岩表面的压力与变形的比值。当隧洞半径为1m时的岩体抗力系数称为单位抗力系数。⑥水压法。模拟水工隧洞工作特性并测定岩体抗力系数的试验方法。

地应力现试验　见地应力测试。

岩体波速测试　利用洞室、钻孔或地表露头现场测定岩土体地震波或声波波速。测线布置原则：当测点岩性为各向同性时，测线按直线布置；当测点岩性为各向异性时，测线应分别按平行或垂直岩体的主要结构面布置。根据测试成果，计算岩体完整性系数

$$K_v=\left(\frac{v_{pm}}{v_{pr}}\right)^2$$

式中K_v为岩体完整性系数；v_{pm}为岩体纵波速度，m/s；v_{pr}为岩块纵波速度，m/s。

试验成果　现场试验结束后试验人员应及时编写试验报告，内容包括试验点位置、地质条件、试验过程、成果参数、结论等，以及整理绘制的曲线、试验点与剪切破坏面照片等附件。

yanti rubian

岩体蠕变　(creep of rock mass)　岩土体在所受应力不变的条件下，随时间延长而发生的持续变形现象。蠕变现象是内、外地质因素共同作用的结果。内因是岩性软弱或

岩土体结构破碎。外因是由于一侧临空具备变形的临空空间和存在力矩作用，包括构造运动、地下水或地表水作用、坡脚下切、地表形态改变、风化等影响因素。

蠕变发展阶段　蠕变随时间的变化，大致可分为初始蠕变、稳态蠕变和加速蠕变3个阶段。

（1）初始蠕变阶段。岩土体变形随时间的增加而增加，但增加的速度逐渐变慢。

（2）稳态蠕变阶段。岩土体变形随时间的增加而匀速增加。该阶段持续时间较长。

（3）加速蠕变阶段。岩土体变形随时间的增加而加速增长，直至破坏。

蠕变变形模式　常见的蠕变有岩层挠曲变形，岩层张裂、架空和错位，连续折断或阶梯状正断型错位，倾倒变形，滑坡蠕变等。

（1）岩层挠曲变形。岩层无明显拉张破坏迹象，主要表现为连续的轻微挠曲变形，变形岩层结构与正常岩体无明显差别。蠕变体内，越靠近地表，蠕变程度越严重。

（2）岩层张裂、架空和错位。挠曲变形超过一定值时，岩层被折断，在脆性岩层中形成架空结构或错位。

（3）连续折断或阶梯状正断型错位。张裂错位进一步发展，岩层被折断，在重力作用下，产生向下位移，构成锯齿状或阶梯状错位，在宏观上形成比较连续的潜在折断滑动面。

（4）倾倒变形。在泥岩、板岩厚度大且分布集中的地段，脆性岩层中的张裂错位相对少见，主要表现为逐步弯曲直至倾倒的变形过程。

（5）滑坡蠕变。为蠕变的终端发展结果。倾倒变形和潜在的折断错滑面及土层内部位移滑面进一步发展，在条件成熟时形成滑坡。

实例　蠕变往往是边坡岩土体变形破坏的前兆，在水电工程施工中要高度重视。1963年10月9日发生的意大利瓦伊昂水库大滑坡是一次沉痛教训。在失事前3年开始的长期观测已发现有蠕变迹象。同年春季以前，大致保持等速蠕变，测得春季、夏季位移速率为0.14cm/d左右。9月18日大雨后位移速度逐日增大直至滑坡。

yanti ruanruo jiegoumian

岩体软弱结构面　(weak structural plane in rock mass)

岩体中力学强度明显低，对岩体稳定起控制作用的结构面。软弱结构面按成因一般可分为原生软弱结构面、构造软弱结构面和次生软弱结构面3种类型。岩体中各种软弱结构面相互切割易形成对岩体稳定不利的组合。有时岩体虽较完整，岩块强度也很高，但由于存在结构面的不利组合仍易于失稳。因此在评价各种软弱结构面对岩体稳定的影响时，还考虑建筑物的种类、规模、作用力的大小与方向并结合软弱结构面组合的形状及其力学参数进行分析研究。

原生软弱结构面　在成岩过程中形成的软弱结构面或软弱层。其中又可分为沉积岩结构面、岩浆岩结构面和变质岩结构面。

（1）沉积岩结构面。如软岩夹层、层面、韵律沉积中的泥质物质、沉积间断面、成岩节理以及火山碎屑岩中的软弱矿物富集带等。

（2）岩浆岩结构面。如侵入岩两侧的接触面与蚀变带、流层、喷出岩的间歇喷发接触面以及原生节理等。

（3）变质岩结构面。变质岩中片麻理和片理以及软弱矿物富集带等。原生软弱结构面的产状比较稳定有规律，岩体工程地质特性呈各向异性，如平行层理或片理方向与垂直层理或片理方向的透水性、变形模量、抗剪强度相差很大。

构造软弱结构面　岩体受构造应力作用所产生的软弱结构面。如断层、劈理、构造节理以及由层间错动形成的软弱夹层等。构造节理不像层面一样只有一组而是同时发育有多组。扭性节理面光滑、延伸长、抗剪强度较小；张性节理面粗糙、延伸短、抗剪强度较大。断层在岩体中出现的频率不如节理高，也不似节理那样均布于整个岩体中，但断层规模大，延伸长，在变形、抗滑稳定方面常起控制作用。

次生软弱结构面　岩体中由于风化、卸荷和地下水等次生作用所形成的软弱结构面，如风化夹层、泥化夹层、风化裂隙、边坡重力裂隙以及卸荷裂隙等，这些软弱结构面多数渗透系数大、变形模量小、抗剪强度低。

yanti shenliu

岩体渗流　(seepage in rock mass)

水在岩体中沿裂隙网络的运动。完整岩块从工程观点可忽略其透水性，而岩体被裂隙所切割后就发生主要沿裂隙网络的水流。岩体与土体在渗透特性上差别很大，主要表现在：① 岩体渗透样本单元体积（representative element volume，REV）非常大；② 明显的渗透各向异性；③ 渗透性的离散性；④（达西）流速比实际流速小若干量级；⑤ 应力环境对岩体渗透性有重大影响；⑥ 地表风化岩体对降雨入渗的调蓄作用。

工程设计中若不考虑岩体渗流的上述特殊性，而借用土体渗流分析方法和实践经验，就可能造成重大失误。

根据岩体不同的特点，岩体渗流的数学模型有等效连续介质模型、裂隙网络模型或非连续介质模型、双重介质模型3种。

（1）等效连续介质模型。将裂隙的透水性平均到岩体，即可得到各向异性等效连续介质或等效孔隙介质渗透模型。其渗透系数可用渗透张量 k_{ij} 表示，按达西定理表达为

$$u_i = -k_{ij} J_i \tag{1}$$

式中 u_i 为沿 i 方向的流速；J_i 为沿 i 方向的水力梯度。

当岩体裂隙发育，REV存在且相对于计算域很小，仅研究恒定渗流问题时才可采用这一模型。各向异性连续介质渗透模型比较成熟，应用非常方便。

（2）裂隙网络模型或非连续介质模型。这一模型认为水只在裂隙内流动。设裂隙的等效隙宽为 a，裂隙内水的流速也可写成达西定理的形式

$$u_i = -kJ_i = -\frac{ga^2}{12\upsilon} J_i \tag{2}$$

式中 g 为重力加速度；k 为裂隙的导水系数；υ 为水的运动黏滞系数。

裂隙内的流量 q_i 则为

$$q_i = u_i a = -\frac{ga^3}{12\upsilon} J_i \tag{3}$$

在水力梯度一定的条件下，裂隙内的流量与隙宽的3次方成正比，此即著名的立方定理。

运用裂隙网络作渗流分析时，需利用探洞或岩石露头对裂隙产状、迹长、隙宽进行实地测量。在大量实测资料基础上用统计方法求得裂隙各几何参数的随机统计参数，再利用蒙特卡洛方法生成与实际网络在统计意义上等效的裂隙样本网络，利用式（2）对裂隙网络建立有限元格式求解。

当岩体裂隙不很发育，其REV过大，不能利用连续介质模型时，应采用裂隙网络渗流模型。当分析与时间有关的非恒定岩体渗流时，必须采用这一模型，否则将导致计算错误。

（3）双重介质模型。视完整岩块为孔隙介质，或将有小裂隙岩体视为等效连续介质，它们周边为裂隙，研究孔隙介质与裂隙之间的水的交换。这种双重介质模型更为符合岩体实际，但增大了渗流分析的工作量。

yanti wendingxing

岩体稳定性 （stability of rock mass） 处于一定时空条件的岩体，在各种力系（自然的、工程的）的作用下保持其力学平衡状态的程度。岩体稳定性是工程地质分析中的一个中心问题，主要研究岩体是否会发生重大的失稳事故。岩体赋存于自然界，在历史上不断经受各种自然力作用和人类活动的影响，从而在某些岩体中可能出现崩塌、滑坡、地下洞室塌方、大坝地基破坏等失稳状态。1959年12月2日，法国马尔巴塞（Malpasset）拱坝，由于坝基失稳而导致溃坝，$4.9\times10^6\ m^3$的库水瞬间下泄，造成重大人员伤亡和财产损失。1963年10月9日，意大利瓦依昂（Vajont）水库近坝库岸发生大规模高速滑坡，在1min内大约有近3亿m^3的岩石崩塌入水库，涌浪高达150～250m，漫过265m高的拱坝，致使下游的市镇遭到毁灭，死亡约2500人。随着岩土工程的规模日趋增大，工程条件日益复杂，岩体稳定性的研究更加引起岩土工程界的注意。

岩体稳定性判据　以狄利克雷（Dirichlet）准则为判据，即稳定性取决于岩体势能（即自由能）驻值的性质。当岩体的势能F的一次变分为零，即$\delta F=0$时，岩体的势能存在驻值；其二次变分$\delta^2F>0$时，为稳定状态；$\delta^2F=0$时为随遇平衡；$\delta^2F<0$时为不稳定状态。

岩体稳定性评价　主要评价方法有刚体极限平衡法、极限分析法、数值法或解析法及可靠性分析法等4种。①刚体极限平衡法。将可能滑动的岩体作为刚体，采用极限平衡原理，计算沿滑动面的抗滑稳定安全系数。②极限分析法。不考虑弹塑性体的变形过程，应用理想弹塑性体（或刚塑性体）处于极限状态时的普遍定理（上限定理和下限定理）求解极限荷载的分析方法。③数值法或解析法。分析岩体的弹塑性区域，并计算失稳的安全系数。由于现代电子计算机的出现，引入有限元等数值计算方法进行岩体稳定性分析，有助于得出更切合实际的结果。④可靠性分析法。其优点在于用失稳概率或可靠度代替过去经常运用的经验安全系数，这一方法正在发展中。

提高岩体稳定性的措施　对岩体进行加固处理，以提高岩体的稳定性，是工程措施的重要研究领域。锚喷技术、灌浆技术、削坡减载、截水排水等，都是有效改善岩体稳定性的措施（见岩基处理）。与此相关的岩体工程监测技术，也是保证岩体工程稳定的重要环节，有助于预防或减轻岩体失稳带来的灾害（见岩体原位观测）。

yanti xiehe

岩体卸荷 （unloading of rock mass） 岩体由于河谷侵蚀下切或人工开挖形成临空面，应力发生重分布，使浅表部岩体因应力释放而向临空面方向发生回弹变形、松弛、拉裂等的现象。岸坡卸荷作用的强弱与地壳上升运动、区域构造稳定性及河谷切割深度有关，一般表现为河谷切割越深，岸坡卸荷越强烈；坚硬完整岩体较软弱薄层岩体卸荷强烈。

卸荷带划分主要依据卸荷裂隙的规模、密集程度、次生充填及岩体松弛特性，辅以波速、地应力、点荷载强度等，一般将卸荷岩体分为强卸荷带、弱卸荷带及深卸荷带。

强卸荷带　卸荷裂隙发育较密集，普遍张开，一般开度为几厘米至几十厘米，多充填次生泥及岩屑、岩块，有架空现象，部分可看到明显的松动或变位错落，卸荷裂隙多沿原有结构面张开。岩体多呈整体松弛。

弱卸荷带　卸荷裂隙发育较稀疏，开度一般为几毫米至几厘米，多有次生泥充填，卸荷裂隙分布不均匀，常呈间隔带状发育，卸荷裂隙多沿原有结构面张开。岩体部分松弛。

深卸荷带　深部裂缝松弛段与相对完整段相间出现，成带发育，张开宽度几毫米至几十厘米不等，一般无充填，少数有锈染或夹泥，岩体弹性波纵波速变化较大，常出现在河谷岸坡正常卸荷带以内完整岩体中。

卸荷裂隙的分布与斜坡地应力的分布有密切关系。河谷下切过程中，随着岸坡侧向应力的解除，边坡产生回弹变形，边坡应力产生相应的调整，其结果是边坡一定深度范围内形成二次应力场分布。应力场的分布影响岩体卸荷的程度。

卸荷带的工程地质特征主要表现在岩体结构松弛和卸荷裂隙的产生，以及由此产生的岩体物理力学性质降低，所以在深山峡谷地区筑坝建库需要适当加大岸坡水平向勘察范围，查明卸荷岩体分布情况，避开岩体强烈卸荷河段，合理选择坝址和布置建筑物。

yanti yuanwei guance

岩体原位观测 （in-situ measurement of rock mass） 用量具或仪器量测岩体表面或内部在开挖、筑坝、水库蓄水等人为因素以及大气降水、地震等自然因素影响下性态变化及其过程的技术。通过量测，可以掌握岩石性态变化，检验岩石力学分析理论，为岩体工程的安全施工与运行提供科学依据，提高岩石工程设计、施工、管理水平，进一步发展岩石力学。观测工作包括确定观测项目、观测仪器选型、观测仪器埋设、测读及资料整理等内容。岩体原位观测在中国开始于20世纪50年代，70年代获得较大发展，现在大多数观测仪器国内都能自行制造，在数量上和质量上基本满足要求。观测设备正向两个方面发展：一方面发展结构简单、便于维护检查、性能可靠的观测仪器；另一方面发展数据自动采集、传输、处理，能遥控遥

测的观测系统。

观测项目及仪器　观测项目主要有位移、应变、应力、地下水等项，在地震区还有地震效应观测。原位观测是一项长期性的工作，要求仪器具有很高的可靠性与稳定性。各观测项目所用仪器设备类型众多，选型时应通过工程类比、理论假设及参阅设计资料，预估观测对象的变形、应力和地下水压力等参数的大小和变化范围，推定观测的时距和历时，并由此确定观测仪器应具备的精度、量程和最低的工作期限。

（1）位移观测。对于坝基与边坡，主要是观测垂直、水平位移及挠度，其中对岩体稳定性影响较大的剪切位移观测最为重要。变形观测成果比较直观、可靠，资料易于分析，是原位观测中最普遍、最重要的项目。所用仪器设备有观测表面变形的经纬仪、水准仪、红外测距仪、收敛计、地面倾斜仪及光纤等，观测内部变形的多点位移计、钻孔测斜仪、挠度计等。此外，采用全球卫星定位系统（GPS）和三维激光扫描技术观测位移的方法也得到了较快的发展。

（2）应变观测。可测得岩体内各点的应变分布及其变化，并根据需要换算位移或应力。所用仪器设备有电阻应变片式、差动电阻式、钢弦式、光纤式等应变计。单个应变计还可串联成锚杆应变计，或组装成平面应变及空间应变量测装置。

（3）应力观测。主要在岩体与建筑物接触面上进行量测，以了解两者之间的相互作用。对岩体内部应力，由于应力计和岩体之间的刚度匹配、埋设技术等还存在一些问题，尚难取得满意结果。所用仪器设备有电阻应变片式、差动电阻式、钢弦式及气压（或液压）平衡式等应力计。

（4）地下水观测。包括岩体中的渗透压力、作用在混凝土建筑物底面上的扬压力及地下洞室支护结构上的外水压力等。所用仪器设备除测压管与水管式地下水压力观测仪器外，其余的仪器的传感器与应力计相同，只是在测头传压膜之前用透水石代替应力计的压力囊。

观测仪器埋设　仪器通常埋设在预先准备好的孔（坑）内，用与周围岩体性质相近的材料充填密实。孔（坑）及其周围的地质情况应作详细编录，并附以平面图和剖面图表示其位置。

观测　开始时首先建立初始值，然后按计划定期量测，一般初期测次较密，以后则根据测值变化速率与工程要求（如水库水位涨落、大气降水、汛期等）逐步调整。观测数据经过仔细审核以后，绘制成测值与时间、工程活动（如开挖、浇筑、填筑、库水位变化等）或自然因素（如大气降水等）的关系曲线。观测资料应在尽可能短的时间内整理分析，发现问题，及时上报。

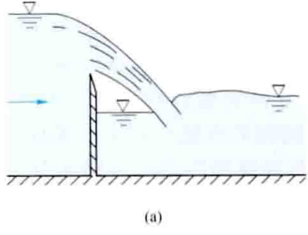
yanliu

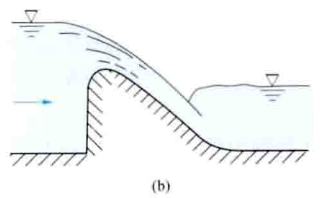
堰流

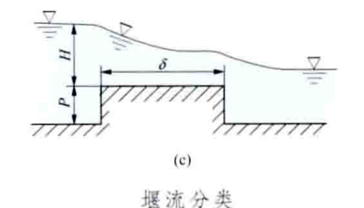
（weir flow）　具有自由面的水流越过各种形式堤堰的溢流形态。堰流是自由面连续的明渠急变流，具有明显的水面降落，并伴有局部水头损失。

根据堰流的水力特点，按堰面形状和堰顶宽（δ）与堰上水头（H）之比 δ/H 将堰划分为薄壁堰、实用堰和宽顶堰3类，见图。$\delta/H>10$ 时视为明渠水流，不属堰流。

（1）薄壁堰。代表形式为尖顶堰。尖顶堰的自由跌流，常被用来作为测流设备，堰口形状有矩形、三角形、半圆形等。


(a)


(b)



(c)

堰流分类

(a) 薄壁堰；(b) 实用堰；(c) 宽顶堰

（2）实用堰。是常用的溢流坝面形式，如奥奇（Ogee）曲线、WES曲线（实用剖面堰）等。有时为增大泄流能力，让堰面出现轻微负压，即真空剖面堰。此外，还有许多特殊形状的实用堰，如拱坝溢流的瘦型堰，渠道引水的驼峰堰、侧堰等。

（3）宽顶堰。常见于低水头砌石坝溢流段、灌溉引水渠道进口、施工围堰的临时过水缺口等。河床式水电站的泄水闸或过水断面束窄的明渠河段，因侧收缩的影响，其水面线与宽顶堰水面降落相似，称无坎宽顶堰流。

堰流的过流能力为

$$Q=mB\sqrt{2g}H_0^{3/2}$$

其中

$$H_0=H+\frac{\alpha_0 v_0^2}{2g}$$

式中 Q 为过堰流量；m 为流量系数；B 为堰顶宽度；g 为重力加速度；H_0 为计入趋近流速水头的堰上工作水头；H 为堰上水头；α_0 为流速分布系数；v_0 为来流趋近流速。常见形式的堰流流量系数值，见表。

各类堰流量系数表

堰流分类	条件	常用形式	流量系数 m
薄壁堰	$\delta/H<0.67$	Bazin 堰	$0.405+0.003/H$
实用堰	$0.67<\delta/H<2.5$	Ogee 坝面	0.492
		WES 坝面	0.502
宽顶堰	$2.5<\delta/H<10$	$P/H>3$	0.385（理论值）
		进口边缘为棱角	0.32
		进口边缘为圆角	0.36

实际工程中的溢流堰常用闸墩分隔为数个孔口，如 n 个宽度为 b 的孔口，这时需增计侧收缩系数 $\varepsilon<1$；有时堰流受下游水位顶托呈淹没状，而需计及淹没系数 $\sigma_s<1$。实际溢流堰的过流量用下式计算

$$Q=\varepsilon\sigma_s mnb\sqrt{2g}H_0^{3/2}$$

Yili He shuixi shuineng ziyuan

伊犁河水系水能资源

（hydropower resources of Ili River System）　据《中华人民共和国水力资源复查成果（2003年）》统计，伊犁河水系在中国境内部分的水能资源理论蕴藏量为793.41亿kW·h/a，占中国水能资源的

1.3%，其中技术可开发资源为 99.47 亿 kW·h/a，占中国水能资源的 0.40%。技术可开发资源大都集中在干流上，其分布见下表。

伊犁河水系水能资源统计表

河流名称	理论蕴藏量（亿 kW·h/a）	技术可开发量		
		电站座数（座）	装机容量（MW）	年发电量（亿 kW·h）
伊犁河水系合计	793.41	71	2592.3	99.47
干流	231.37	29	827.5	27.93
支流：特克斯河水系	270.33	15	151.8	7.52
巩乃斯河水系	89.81	10	184	11.13
伊犁喀什河水系	201.90	17	1429	52.89

伊犁河有 3 条源流：特克斯河、巩乃斯河和伊犁喀什河。一般认为特克斯河为干流，它发源于南天山山脉，先自西向东流，当巩乃斯河汇入后，转而自东向西流，喀什河汇入后始称伊犁河，经伊宁市出中国境进入哈萨克斯坦。巩乃斯河和喀什河都发源于天山北麓，自东向西流，相互平行。干流拥有理论蕴藏量 231.37 亿 kW·h/a，约占全水系的 1/3。技术可开发水电站（含灌区电站）29 座，装机容量 827.5MW，多年平均年发电量为 27.93 亿 kW·h。伊犁喀什河为最大支流，水能资源也较丰富，拥有理论蕴藏量 201.90 亿 kW·h/a，技术可开发水电站 17 座，装机容量 1429MW，多年平均年发电量为 52.89 亿 kW·h。

Yitaipu Shuidianzhan

伊泰普水电站 （Itaipu Hydropower Station） 位于南美洲巴拉那河中游巴西与巴拉圭两国的边界河段上，一期装机 18 台，总容量 12 600MW，多年平均年发电量 750 亿 kW·h，是 20 世纪世界上已建装机规模最大的水电站，见图 1。工程由巴西和巴拉圭两国共建，并分享电力。1992 年一期 18 台机组全部投产发电，2006～2007 年扩机 2 台，总装机容量达 14 000MW，是世界上已建规模第二大的水电站。2012 年发电量达到最大，为 982.87 亿 kW·h。向巴西一侧输电电压 765kV，向巴拉圭一侧输电电压 500kV。



图 1　伊泰普水电站大坝

水文和水库特性　坝址以上流域面积 82 万 km²，多年平均年径流量 2860 亿 m³。水库正常蓄水位 220.00m，相应库容 290 亿 m³，调节库容 190 亿 m³。连同其上游已建的干支流水库，共计调节库容 1265 亿 m³，库容系数为 0.44，调节性能良好。

工程地质条件　坝址区基岩主要为厚层，玄武岩，夹有多孔杏仁状玄武岩和角砾岩互层，未发现有大的断层，河床覆盖层厚仅 20m，工程地质条件较好。

枢纽布置　枢纽工程由大坝、泄水建筑物、厂房等组成，见图 2。

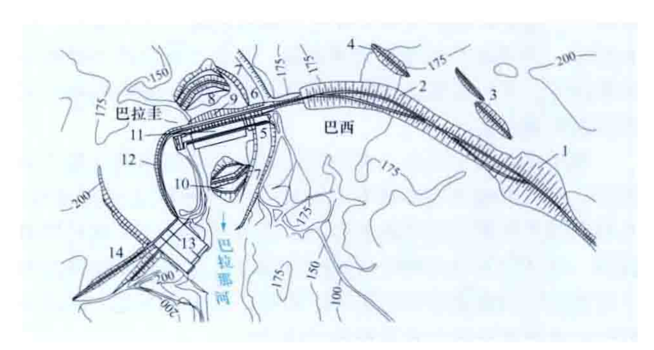


图 2　伊泰普水电站枢纽平面布置图

1—左岸土坝；2—堆石坝；3、4—堤；5—导流明渠；6—导流控制坝段；7—混凝土拱形围堰；8—上游围堰；9—双支墩主坝；10—下游围堰；11—发电厂房；12—单支墩大头翼坝；13—岸边溢洪道；14—右岸土坝

大坝　包括左岸土坝（长 2294m）、左岸堆石坝（最大坝高 70m，长 1984m）、导流控制坝段（最大坝高 162m，坝顶长 170m）、双支墩主坝（最大坝高 196m，坝顶长 1064m，为世界上已建最高的支墩坝）、单支墩翼坝（最大坝高 64.5m，坝顶长 986m）、右岸岸边溢洪道（最大坝高 44m，宽 390m）、右岸土坝（长 872m）。挡水前沿总长 7760m（见图），另留有备建船闸的位置。

泄水建筑物　溢洪道布置在右岸，设 14 个表孔，分三区，单孔宽 20m、高 21.3m，堰顶高程 200.00m，泄槽长 483m，用弧形闸门控制，采用挑流消能，最大泄洪能力 62 200m³/s。

厂房　坝后地面厂房，位于主河槽。压力钢管直径 10.5m，采用背管布置，外包钢筋混凝土。厂房长 968m、高 112m，内装 18 台水轮发电机组，设有两个安装间和两个控制室。2006 年和 2007 年先后扩机 2 台。

混流式水轮机额定水头 118.40m，转轮直径 8.65m，额定流量 690m³/s，最高效率 94%～95%。属巴西的 9 台发电机频率为 60Hz，属巴拉圭的 9 台频率为 50Hz。转速分别为 92.3r/min 和 90.9r/min。

工程施工　工程于 1974 年开始准备，1975 年 10 月开工，1978 年 10 月截流，1984 年开始发电，1991 年一期机组全部投产。采用二期导流施工，一期采用主河槽导流，开挖左岸一条导流明渠，并修建 12 个宽 6.7m、高 22.0m 的导流底孔（后建成为电站的一部分，安装了 3 台机组）；二期大江截流后，采用底孔导流，底孔封堵上游进口采用两道门，下游采用一道门。扩建工程于 2007 年完成。

主要工程量和造价：土石方工程量 9245 万 m³，混凝土工程量 1180 万 m³。1974 年提出的可行性报告所列直接工程费用为 23.5 亿美元，连同施工期利息等共计 31 亿美元；1991 年竣

工时，总投资达234亿美元，单位投资1875美元/kW。

yimin anzhi shishi guanli

移民安置实施管理 (resettlement implementation and management) 地方政府根据批准的移民安置规划，组织移民搬迁安置、生产安置、城集镇迁建、专业项目建设、补偿补助项目兑付等的管理工作。中华人民共和国国务院令第471号文件《大中型水利水电工程建设征地补偿和移民安置条例》规定，移民安置工作实行政府领导、分级负责、县为基础、项目法人参与的管理体制。水电工程移民安置任务较重的省、区、市地方政府均制定了本行政区域内的移民安置实施管理办法。

移民安置工作机构 在中国，有水电工程移民安置任务的省、区、市地方政府基本上都设立有水库移民管理机构，凡有水电工程移民实施任务的市、县政府都设立了移民管理机构。项目法人也有相应机构或者部门负责移民安置规划设计等前期以及实施阶段的协调工作等。大中型水电工程设计单位也均设置了移民安置规划设计部门。

各参与方责任分工 工程建设征地范围内的实物调查，由项目法人会同工程项目所在地的地方政府实施；移民安置规划大纲、移民安置规划由项目法人编制，并报审核批准；县级以上地方政府负责按照批准的移民安置规划组织实施。一般情况下，县级及以上地方政府移民管理机构代表政府牵头组织移民安置实施工作，交通、水利、电力等其他专业部门协助组织实施相应的专业项目施工管理。省级移民管理机构负责移民安置政策的研究与制定，规划设计成果的预审或审查，实施计划、资金计划的审批与下达，移民安置工作的指导、检查、督促与协调等工作。

移民安置实施组织设计 移民安置实施组织设计是在认真研究移民安置实施的条件，根据批准的工程建设进度计划和移民安置规划的基础上，拟订移民安置实施组织方案，考虑必要的移民安置项目实施周期，合理安排移民安置实施进度计划及资金使用计划，明确移民安置实施工作的组织主体责任单位和有关参与单位的任务与相应职责。实施组织设计一般由主体设计单位会同地方政府共同编制。

移民安置监督评估制度 移民安置监督评估包括移民安置综合监理、移民安置独立评估。移民安置综合监理主要由有资质的单位对移民安置实施全过程的质量、进度、资金进行监理。移民安置独立评估主要由有资质的单位对移民安置实施前后生产生活水平进行对比评估，明确移民安置是否达到规划目标，并提出改进措施。

yimin anzhi zongti guihua

移民安置总体规划 (overall planning of resettlement) 对建设征地范围内的损失进行补偿、重建等活动作出的统筹安排、技术策划和移民安置标准、方案的初步拟订，是移民安置规划大纲编制的基本依据。

移民安置总体规划的编制当以资源环境承载能力为基础，遵循本地安置与异地安置、集中安置与分散安置、政府安置与移民自找门路安置相结合的原则，尊重少数民族的生产、生活方式和风俗习惯，考虑与国民经济和社会发展规划，以及土地利用总体规划、城市总体规划、村庄和集镇规划的衔接。

移民安置总体规划应分析确定移民安置规划设计的水平年、移民安置任务、移民安置规划目标和标准、移民工程建设规模和标准、移民安置容量和移民安置去向、移民安置方式，研究减少征地损失的措施，协调移民安置各项目间关系，分析拟订移民安置方案，并进行移民生活水平评价、预测等。

移民安置总体规划一般由具备相应资质的规划设计单位会同有关地方政府共同编制。

yimin houqi fuchi

移民后期扶持 (follow-up support for resettlement) 为解决水库移民遗留问题，帮助水库移民脱贫致富，促进库区和移民安置区经济社会发展，国家通过设立大中型水库后期扶持基金、库区基金、小型水库移民扶助基金等政府性基金以及增加库区和移民安置区的投入力度等措施，对安置后的农村移民进行帮扶。

后期扶持资金能够直接发放给移民个人的应尽量发放到移民个人，用于移民生产生活补助；也可以实行项目扶持，用于解决移民村群众生产生活中存在的突出问题；还可以采取两者相结合的方式。具体方式由地方政府在充分尊重移民意愿，听取移民村群众意见的基础上确定，并编制切实可行的水库移民后期扶持规划。

发展历程 中国实行开发性移民方针，采取前期补偿、补助与后期扶持相结合的办法，使移民生活达到或者超过原有水平。2006年以前，为了帮助移民改善生产生活条件，国家先后设立了库区维护基金、库区建设基金和库区后期扶持基金。2006年以后，国家水库移民后期扶持政策得到了进一步补充调整和完善。

1981年，中国电力工业部和财政部颁发《关于从水电站发电成本中提取库区维护基金的通知》，对电力工业部直属水电站从发电成本中提取库区维护基金，提取标准为每千瓦时0.1分。主要用于：①库区移民生产、生活的困难补助；②库区移民的人畜饮水、提水灌溉工程及交通设施的维护；③水库防护工程的维护。

1996年，国家计划委员会、财政部等联合发出《关于设立水电站和水库库区后期扶持基金的通知》，从1996年1月起，对1986～1995年投产和1996年以前国家批准开工建设的大中型水电站、水库设立库区后期扶持基金，用于扶持库区移民发展生产和解决遗留问题。该基金以国家批准的移民数量作为计算的基数，按每个移民每年250～400元的标准计提，共提取10年，最高提取标准不准超过每千瓦时0.5分。

为解决1985年底以前投产的中央直属水库农村移民遗留问题，2002、2003年国务院办公厅分别转发了《关于加快解决中央直属水库移民遗留问题若干意见的通知》和《库区建设基金征收使用管理办法》。文件规定有关省（区、市）从电费中提取的库区建设基金，按本地区销售的全部电量为计算基数，控制在每千瓦时0.2分以内，重点用于贫困移民所需的基础设施项目支出、生产开发项目支出、生产资源调整和移民再搬迁安置项目支出、规划设计费、科技推广费、代征手续费等。中央安排的移民扶持资金数额，根据1985

年底前投产的中央直属水库现有移民人数，按人均6年累计1250元核定，地方配套资金按1∶1的比例安排。

2006年以后，中国政府进一步完善了水库移民后期扶持政策，现行的移民扶持资金包括大中型水库移民后期扶持基金、大中型水库库区基金、小型水库移民扶助基金等。原库区建设基金并入完善后的水库移民后期扶持基金，原库区后期扶持基金并入库区基金。

大中型水库移民后期扶持基金　根据中国国务院国发〔2006〕17号文件《关于完善大中型水库移民后期扶持政策的意见》和财政部财综〔2006〕29号文件《大中型水库库区基金征收使用管理暂行办法》等文件，中央政府设立的帮助解决大中型水库农村移民生产生活问题的政府性基金。后期扶持范围为大中型水库的农村移民，其中2006年6月30日前搬迁的水库移民为现状人口，2006年7月1日以后搬迁的水库移民为原迁人口，转为非农业户口的农村移民不再纳入后期扶持范围。扶持标准为对纳入扶持范围的移民每人每年补助600元。扶持期限为对2006年6月30日前搬迁的纳入扶持范围的移民，自2006年7月1日起再扶持20年；对2006年7月1日以后搬迁的纳入扶持范围的移民，从其完成搬迁之日起扶持20年。扶持方式为后期扶持资金能够直接发放给移民个人的应尽量发放到移民个人，用于移民生产生活补助；也可以实行项目扶持，用于解决移民村群众生产生活中存在的突出问题；还可以采取两者结合的方式。具体方式由地方各级人民政府在充分尊重移民意愿，并听取移民村群众意见的基础上确定，并编制切实可行的水库移民后期扶持规划。后期扶持基金从2006年6月30日起开始征收，由各省级电网企业在向电力用户收取电费时一并代征，征收标准为每千瓦时0.19～0.83分。

大中型水库库区基金　中国中央政府将原库区维护基金、原库区后期扶持基金及经营性大中型水库承担的移民后期扶持资金进行整合后而设立的政府性基金。根据财政部财综〔2007〕26号文件《大中型水库库区基金征收使用管理暂行办法》，库区基金从有发电收入的大中型水库发电收入中筹集，根据水库实际上网销售电量，按不高于每千瓦时0.8分的标准征收。地方政府在安排库区基金时，应将其中的75%用于支持实施库区及移民安置区基础设施建设和经济发展规划，以及解决水库移民的其他遗留问题，其余部分用于库区防护工程及移民生产、生活设施维护。

小型水库移民扶助基金　2006年，《国务院关于完善大中型水库移民后期扶持政策的意见》规定，省级政府可通过提高辖区内全部销售电量（扣除农业生产用电）的电价筹集资金，统筹解决小型水库移民的困难，并保证在建后期扶持项目的后续资金投入，确保项目按期建成并发挥作用。提价标准不超过每千瓦时0.05分。

其他后期扶持措施　国发〔2006〕17号文件和国家发展改革委、财政部、水利部等14个部委联合印发的发改农经〔2010〕2978号文件《关于促进库区和移民安置区经济社会发展的通知》指出：

要多层次、多渠道加强对库区和移民安置区经济社会发展的支持并建立长效机制，把增加库区和移民安置区的投入力度作为落实后期扶持政策的重要任务，从各种渠道积极筹措资金，按照“统一规划、作用互补，渠道不乱、用途不变，各负其责、各记其功”的原则，合力加快建立促进库区和移民安置区经济平稳发展、基础设施完善、移民持续增收、社会和谐稳定的长效机制，切实加大库区和移民安置区投入，深入推进水库移民后期扶持政策全面落实。国务院有关部门在安排农村道路、农村饮水安全、危房改造、农田水利设施、农产品生产基地建设、水土保持、扶贫开发、农村劳动力转移、农村沼气、农村电网完善、空心村整治、农村社会服务、基础教育、职业教育和移民技能培训、学前教育、农村教师周转宿舍建设、乡村医疗卫生机构等方面年度投资计划时，要向库区和移民安置区倾斜，优先安排库区和移民安置区经济社会发展项目，鼓励采取切块或戴帽下达等方式安排资金用于库区和移民安置区基础设施建设和发展社会事业；同时，各省（区、市）要积极筹措资金，努力拓宽投资渠道，加大库区和移民安置区资金投入，在安排地方政府性资金时，要向库区和移民安置区倾斜；鼓励社会捐助和企业对口帮扶，努力拓宽资金渠道。

移民后期扶持的效果　截至2010年底，中国纳入大中型水库移民后期扶持政策范围的农村移民人数共计2365万人，其中采取资金直补方式扶持的人数为1585万人，采取项目扶持的人数为638万人，采取两者结合扶持的人数为142万人。中央政府累计拨付后期扶持基金683亿元，每人每年600元的后期扶持资金已全部兑现。同时，全国有22个省（区、市）开征了库区基金，累计征收40亿元，有24个省（区、市）开征了小型水库移民扶助基金，累计征收28.6亿元。自2006年国家实施大中型水库移民后期扶持政策以来，农村移民人均纯收入占同期全国农村居民人均纯收入的比例，由2004年的53%提高到2010年的75%，生产生活条件明显改善。

yizhongliu

异重流　(density current)　可以相混的两种或两种以上的流体因密度差异而发生的相对运动。当进入水库的挟沙浑水与库内清水相遇时，在适宜的条件下，浑水会潜入清水下面，沿库底向坝前运动形成水库异重流。水库浑水异重流是挟沙水流的一种特殊运动形式，与一般明渠水流不同，不是水流挟带泥沙，而是泥沙的存在造成有效重力，驱使挟沙水流运动。大气中云雾的运行、火电厂冷却池中冷热水的相互运动，以及河流入海口海水沿河底上溯形成的盐水楔等也是自然界常见的异重流现象。

中国于20世纪50年代中期开始在官厅水库系统地进行异重流的观测和研究。根据水槽试验及野外观测资料分析，水库异重流的产生条件可近似用下式判断

$$\frac{u_0^2}{(\Delta\rho/\rho')gh_0}=0.6$$

式中 u_0 及 h_0 分别为异重流潜入点处的流速和水深；$\Delta\rho$ 为清浑水的密度差；ρ' 为浑水密度；g 为重力加速度。

由上式可见，水库入库段如 u_0 过大或 $\Delta\rho/\rho'$ 过小都不能产生异重流。悬移质中要有一定数量的细泥沙也是形成异重流的必要条件。异重流产生后运行到坝前需具备的条件为：①进库流量需达到一定数值，并有一定的持续时间；②水库纵向有一定的比降。水库平面上的扩大、缩小及弯道等局部损失，不利于异重流向坝前运动。

利用异重流排沙是减少水库淤积的有效方法，特别是在干旱地区，为了节约水量，利用异重流排沙更有重要意义。水库异重流排沙率（一次洪水排出水库的沙量与入库沙量之比）取决于到达坝前异重流的含沙量及坝前排沙孔的适时开启，以及排沙孔口的尺寸、高程等。异重流的挟沙能力与其流速有关，流速大所能挟带的泥沙颗粒粗，含沙量也大。当含沙量较高的浑水进入水库后，会形成高浓度异重流。由于含沙量高，泥沙沉降极其缓慢。又因清浑水的密度差大，界面掺混作用减弱，异重流排沙能持续较长的时间，所以在含沙量高的河流上的水库，异重流排沙率亦较高。如美国米德湖水库（Lake Mead），异重流平均排沙比为 27%；中国黄河干、支流上的刘家峡、黑松林等水库，异重流排沙比可达 55%～60%。

参考书目

钱宁，万兆惠．泥沙运动力学．北京：科学出版社，1983.

yiliuba

溢流坝 （overflow dam） 坝顶部设有泄水孔口，兼作挡水和泄水的建筑物。又称滚水坝。常设于混凝土坝或砌石坝上，属表孔泄水建筑物，由溢流堰、闸墩、胸墙、闸门、消能工等组成。溢流坝作为主要的泄水建筑物，一般布置在河床坝段中，以利于消能防冲及与下游水流的平顺衔接。在消能区有时需设置导墙，与相邻的尾水渠、引航道等分隔开。当河道较狭窄时，也可采用溢流坝和发电厂房在河床重叠布置的形式（见溢流式厂房）。溢流坝平面布置见图 1。溢流坝也是挡水建筑物，断面设计除满足水力学要求外，尚应满足挡水建筑物的稳定、应力和防渗要求。

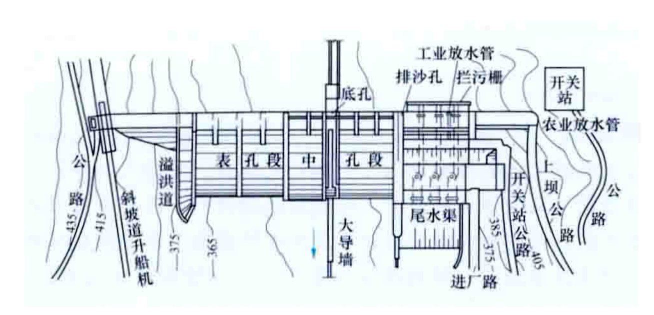


图 1 溢流坝平面布置图

类型 分为有闸门控制、无闸门控制和虹吸溢流坝 3 种。有闸门控制的溢流坝能够调节水库蓄水位和下泄流量，有开敞式和在闸门上加胸墙式两种形式，剖面布置见图 2。无闸门控制的溢流坝，蓄水位只能与堰顶齐平，泄洪时靠壅高库水位形成水头，逐渐增大泄量，适用于小型工程或具有较长溢流前沿的溢流坝。虹吸溢流坝是一种特殊的溢流坝，坝顶设虹吸管，当库水位超过正常水位时，虹吸管产生虹吸作用开始过水；当水库水位下降到正常水位以下时，自动停止过水。这种溢流坝泄流量稳定，但泄量不大，只在中小型工程或压力前池中采用。

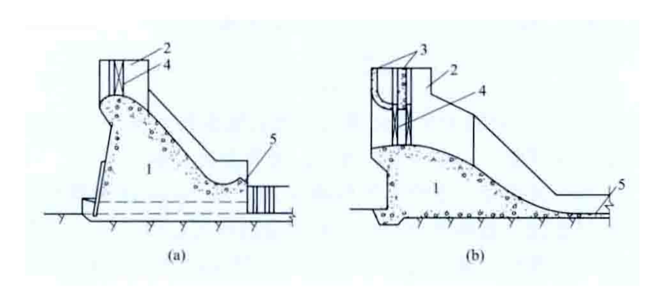


图 2 溢流坝剖面布置图

(a) 开敞式溢流坝；(b) 有胸墙的溢流坝

1—溢流堰；2—闸墩；3—胸墙；4—闸门；5—消能工

溢流堰面体型 关系到溢流坝的泄流能力、流态稳定和压力分布均匀等问题，应通过水力计算、水工水力学模型试验进行设计。溢流堰堰面曲线是按照通过堰顶的水舌轨迹拟定。设计中利用试验所得的经验公式，按定型水头来计算确定堰面曲线。定型水头一般稍小于堰顶最大水头，以保证设计情况下流态稳定和不出现负压。当遇校核洪水，堰顶出现最大水头时，堰面将产生设计允许的负压值。有胸墙的堰面曲线由试验拟定，有时闸门局部开启成为这种堰面曲线设计的控制条件。溢流坝的堰面曲线和下游坝坡相切，然后接直线段和反弧面进入下游消能工（挑流鼻坎、面流坎、消力戽或消力池等）。

闸墩和胸墙 闸墩用来承受闸门的推力。胸墙用来调整闸门设置的高程。它们的形状对溢流坝的泄流能力有影响。闸墩头部宜采用椭圆形或抛物线形，以减少水流侧收缩对泄流能力的影响。闸墩尾部有尖尾墩、方尾墩和宽尾墩三种，见图 3。尖尾墩有利于减少墩尾的冲击波；方尾墩有利于水流掺气；宽尾墩是中国发展的一种新的消能设施，它扩大闸墩尾部的厚度，缩小堰面出流宽度，有助于加强消力池水跃消能效果。水流经宽尾墩收缩后流入消力池，形成三元水流的水跃，可以减小消力池尺寸，对戽流消能也可起到强化消能作用。这种形式的消能工已在中国安康、五强溪、岩滩等水电站工程中采用。

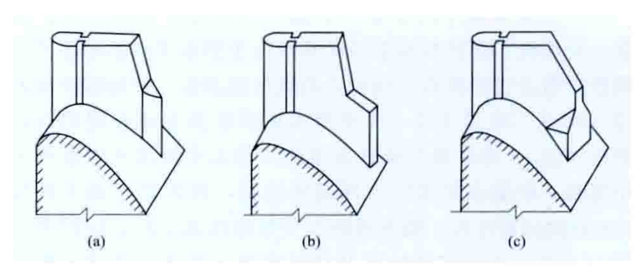


图 3 溢流坝闸墩形式

(a) 尖尾墩；(b) 方尾墩；(c) 宽尾墩

溢流坝的闸门 见泄洪闸门。

水力计算 无胸墙溢流坝闸门全开时的泄流流量计算公式为 $Q=mB\sqrt{2g}H^{1.5}$，式中 Q 为泄流量；m 为流量系数；B 为溢流堰净宽；g 为重力加速度；H 为堰顶以上水头。公式中泄流量和堰顶以上水头呈 1.5 次方的关系，说明这种溢流堰具有较大的超泄能力，从而可控制水库水位上升速度，减少坝顶超高和库区淹没损失。有胸墙的溢流坝的泄流能力在高水位孔口被淹没时为孔口出流，而在低水位孔口未被淹没时为自由堰流，当堰顶水头变化时会出现堰流到孔口出流的过渡现象，其泄流量和水头的关系要通过试验测定。虹吸溢流坝的泄量取决于虹吸管的落差，但落差不能太大，以免管道内发生真空。

运行方式 无闸门控制的溢流坝和虹吸溢洪道的堰顶与水库正常蓄水位齐平，超过正常蓄水位即可过水，无须人为

控制。由于水库的调蓄作用，其下泄流量不会大于入库洪峰流量，且结构简单、运行管理方便可靠，但泄流时水位壅高较大，一般在中小型水电工程中采用。有闸门控制的溢流坝堰顶低于水库正常蓄水位，堰顶以上由闸门挡水，利用闸门开启度控制下泄流量，泄流能力较大，闸门全开时，下泄流量可能超过入库洪峰流量。泄洪操作时可将所有闸门按同一开度开启，也可只开启部分闸孔以调节下泄流量，但要尽量对称开启，以利下游流态稳定。

yiliushi changfang

溢流式厂房 （overflow type power house） 位于混凝土溢流坝段坝趾下游的水电站厂房。坝上下泄的水流经过厂房顶部进入下游河道，见图1和图2。



图1 溢流式厂房

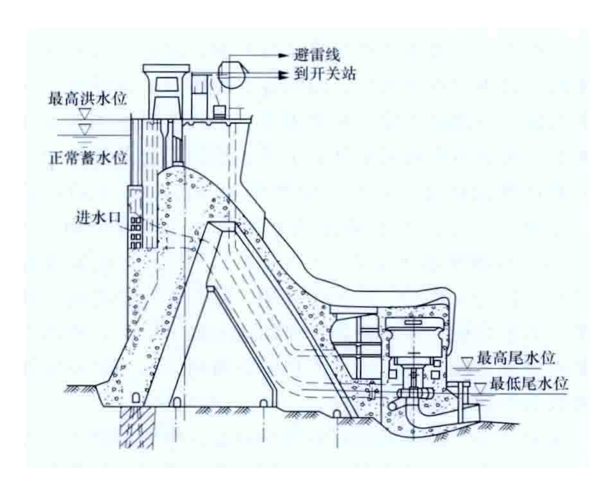


图2 溢流式厂房横剖面图

水库下泄洪水流量大，水头较高，河床狭窄，溢洪与发电分区布置有一定困难时，溢流式厂房有时是合适的方案。溢流式厂房可用于各种形式的混凝土坝，如重力坝、拱坝、支墩坝。大中型水电站安装的水轮发电机组多为立轴混流式，引水发电进水口布置类似坝后式厂房，压力管道埋设于坝体内。按泄水条件，溢流式厂房有厂顶溢流式和厂前挑流式两种类型。

（1）厂顶溢流式厂房。厂房顶板全部或部分兼作溢洪道泄槽，引导水流泄入下游河道，泄槽体型需要根据水力条件设计，并通过水工水力学模型试验优化；当流速很高时（如超过20m/s），过流面易遭空蚀破坏，要采取提高过流面平整度、掺气减蚀等措施。中国新安江水电站采用的就是这种厂房。

（2）厂前挑流式厂房。厂房位于溢洪道挑流鼻坎下游，过坝下泄水流经鼻坎挑起，跃过厂房屋顶落入下游尾水渠。然而，在宣泄小流量和溢洪道闸门启闭过程中，水舌难免落到厂房屋顶，所以厂房结构要具备耐受该工况下的水流冲砸。采用这种厂房的水电站有中国贵州乌江渡水电站、云南漫湾水电站。

厂房与坝体的连接方式有：①厂坝整体连接；②厂坝完全分开，厂房独立承受外荷载；③厂房下部结构与坝体整体连接，上部结构与坝体分开；④厂房下部结构与坝体分开，上部结构与坝体连接。采取何种方式，应根据基础地质条件、坝型、坝高、厂房稳定性和抗震性，经技术经济比较确定。

溢流式厂房多为封闭式，可避免泄洪水流雾化对厂内的影响。厂房结构刚度能经受各种工况水流的作用力，结构的自振频率一般大于水流的脉动优势频率，不致引起共振现象。溢流板下厂坝之间通常有较大空间，可布置副厂房，有的还布置主变压器及开关站。主变压器场、开关站也有的布置于坝顶或坝下游岸边，视地形条件而定，但设计中要注意避开水流雾化区。厂房对外交通一般采用下游岸边公路，路面要高出下游最高洪水位并避开溢流溅落区，当布置上有困难时，可改用交通隧洞进厂。岸边公路穿过水流雾化区严重地段要设防护廊道，但泄洪概率较小的水电站，允许交通中断临时改用其他通道的也可不设防护廊道。

溢流厂房的运行条件类似坝内式厂房，采光及自然通风条件差，主要依靠人工照明和机械通风。溢流可能引起河床冲刷和淤积，要加强岸坡保护。

yinshui fangsha

引水防沙 （sediment prevention in diversion work）

防止泥沙进入引水口的措施。在多沙河流上引水，会有部分泥沙随水流进入引水系统，如果处理不当，会造成引水系统的淤积及水轮机过水部件磨损。由于悬移质泥沙与推移质泥沙的运动规律不同，防止泥沙进入引水口的措施也不一样。防止悬移质泥沙进入引水口的主要措施是在渠首或干渠上修建沉沙池或通过水库沉沙。水库沉沙是指水库断面流速小到一定程度，使悬移质粗沙沉积于库内，而后通过水库敞泄将淤沙排出库外。这种方式需要水库在汛期满足一定的过水面积。防止推移质泥沙进入引水口的主要措施是在渠首设置冲沙闸、拦沙坎、束水墙、导沙坎。

引水渠首可分为无坝引水与有坝引水两大类。

无坝引水常布置在弯曲河段下端凹岸，引表层清水入渠。无坝引水不适宜两岸引水，且引水比不宜太大。

有坝引水的形式很多，主要有人工弯道式、正面排沙侧面引水式、底格栏栅式等。

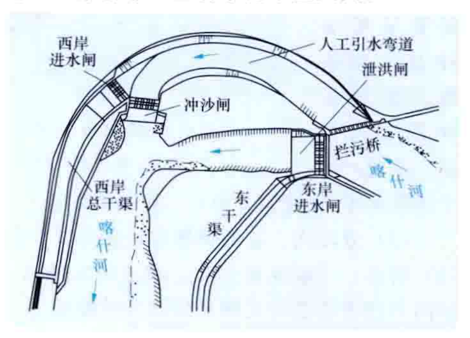


图1 喀什河渠首布置

（1）人工弯道式。在渠首上游修建一

人工弯道，并将引水渠首布置在弯道凹岸，利用弯道环流排沙，引用表层清水，见图1。

（2）正面排沙侧面引水式。渠首侧面引水，正面排沙。在进水闸前设置沉沙冲沙槽，在冲沙闸关闭期间起沉沙池的作用。冲沙槽内淤积的泥沙，需要定期冲洗。

（3）底格栏栅式。适用于粗颗粒较多的山区河流。利用布置在引水渠首顶部的格栏栅，把粗颗粒卵砾石拦截在栅条上，较清水流通过栅条进入廊道取水口，见图2。底格栏栅式渠首结构简单，工程量小，但粒径小于格栏栅间隙的泥沙仍会进入引水口，且格栏栅易堵塞。

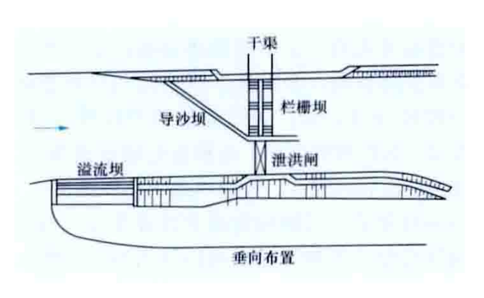


图2 底格栏栅式示意图

无论哪种形式的渠首，都难免有少量推移质泥沙进入，常需对这部分泥沙进行再处理。常用措施有：①在进水闸下游设置截沙槽或沉砾池拦沙；②利用冲沙闸或冲沙廊道排沙。

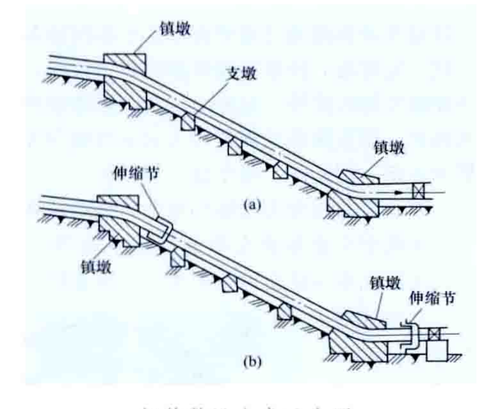
yinshui mingguan

引水明管

（diversion pipe） 敷设于地面的有压引水道。管内为有压流，适用于中小型引水式水电站。其管线布置应避免过大的起伏。可架设于支墩和镇墩上，也可铺设于混凝土座垫上。常用的引水明管有钢管和钢筋混凝土管两种。

钢管 由钢板焊接而成，多采用压力容器钢，管壁要涂防锈漆保护。钢管多架设于镇墩和支墩上。敷设方式分为连续式和分段式两种。

（1）连续式。管身在镇墩间是连续的，其间不设伸缩节，如图（a）所示。这种方式在温度变化或镇墩发生不均匀沉陷时，管壁将出现较大的超静定应力。对明管的安装要求较高，对镇墩的地基条件要求也较高。因此，除个别管段（如岔管段）外，一般不宜采用。



钢管敷设方式示意图
（a）连续式；（b）分段式

（2）分段式。在两镇墩间设伸缩节，将管身分段，如图（b）所示。当温度变化时，管道可以伸缩，温度应力较小，轴向力仅为管道与支座及伸缩节的摩擦力。在明管中常用分段式结构。

为了减小管跨长度，在镇墩间设置支墩，支墩只起支承的作用，不固定钢管可减少管壁纵向应力，并可减小伸缩节漏水。支墩上设有金属垫板或支座，以减小摩擦力。支墩用浆砌石或混凝土建于地基上。

钢筋混凝土管 分现场浇筑和预制两类。预制管又分普通钢筋混凝土管与预应力钢筋混凝土管两种。普通钢筋混凝土管适用于水头在50m以下，水头H与管径D的乘积HD值不超过50m^{2}的情况。管壁厚一般为8～25cm。预应力钢筋混凝土管能承担较高内水压力，HD值可达2000m^2。它是由高强度钢丝加力缠绕在微膨胀水泥制作的混凝土管芯外，其外面再喷一层水泥砂浆保护，抗裂性能比普通钢筋混凝土管好，充分发挥了钢丝的强度。钢筋混凝土管通常铺设于混凝土座垫上，要做好管段间的接缝止水。

yinshui mingqu

引水明渠

（diversion channel） 引水式水电站将水引至压力前池的渠道。渠道纵坡平缓，渠内水流流速较低，在一定条件下，它是一种较经济的无压引水建筑物，多用于中小型水电站。

设计原则 包括：①无压引水式水电站通过引水明渠集中落差。因此，明渠纵坡应比天然河道纵坡小，中低水头大流量引水渠道、自动调节渠道、清水渠道以及土渠，多采用1/12 000～1/2000的较缓纵坡；高水头水电站的引水渠道、傍山渠道、多泥沙渠道等，多采用1/2000～1/500的较陡纵坡。明渠线路宜沿等高线布置，渠线上不宜有陡坡跌水，采用明渠和明流隧洞或暗渠、渡槽、倒虹吸相结合的布置，以避免深挖高填。渠线宜顺直，转弯半径宜不小于渠水面宽的2.5～5倍。②在填方上建渠道易漏水、塌滑，故渠道应尽量建于挖方中。渠道选线尽量躲开塌方、滑坡、泥石流、漏水地段，且不宜在冻胀性、湿陷性、膨胀性、分散性、松散坡积物以及可溶盐土壤上布置渠线。③渠道横断面常为梯形和矩形，边坡坡度根据地基岩土及护坡的稳定条件确定。渠顶应超过涌波高度，并有一定安全超高。④渠道的水流速度，限制在不冲、不淤的流速范围内，土渠多采用0.6～0.9m/s，衬砌渠道多采用1～2m/s。⑤渠线上根据需要设置泄水、拦污、排沙、排冰等设施。⑥为了减少渗漏、降低糙率、防止冲刷、提高流速、增加边坡稳定性等，选用合适材料做渠道衬砌。⑦渠道进水口常设有闸门，用以控制调节水流或为渠道检修提供条件。

渠道衬砌 渠道衬砌材料有混凝土、钢筋混凝土、沥青混凝土、干砌石、浆砌石及土工织物等。混凝土衬砌是最常用的一种，分整体浇筑和预制板铺砌两种。整体浇筑的衬砌厚8～12cm。一般设温度伸缩缝，间距为2～5m。预制板一般厚6～8cm。当渗透压力影响衬砌稳定时，在混凝土衬砌下应设排水系统。

yinshuishi shuidianzhan

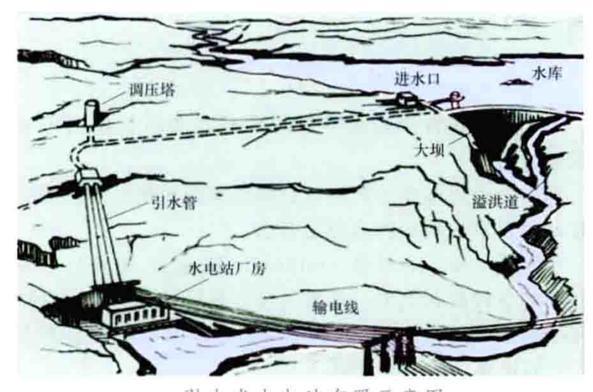
引水式水电站

（conduit hydropower station） 由引水系统集中天然河道落差发电的水电站。引水式水电站一般由挡水建筑物、泄水建筑物、引水系统、水电站厂房、尾水隧洞（或尾水明渠）及机电设备等组成。引水式水电站适宜建在河道多弯曲或河道坡降较陡的河段，用较短的引水系

统可集中较大的水头；也适宜于高水头水电站，避免建设过高的挡水建筑物。跨流域引水发电的水电站必然是引水式水电站。

引水式水电站的主要特点有：①挡水建筑物较低，库容小，调节性能差；②淹没损失少；③使局部河段减少流量；④枢纽布置分散，不便于运行管理。

引水式水电站分为有压引水与无压引水两类。无压引水式水电站用无压引水道（引水明渠或无压隧洞）输送水流到压力前池，通过压力管道把水引到水轮发电机组发电。有些无压引水式水电站还要设尾水明渠。这类电站靠压力前池或靠明渠小范围水位变化调节引水流量，但可调蓄的容积很小，调节性能很差，多为径流式水电站，如中国新疆的玛纳斯梯级水电站。有压引水式水电站用有压隧洞或钢管从进水口输送水流到厂房，有些电站还要设置调压室。有压引水式水电站的厂房位置可在岸边、地下或地上。若采用地下式厂房还可分为首部式、中部式或尾部式。首部式的引水隧洞短于尾水隧洞，尾部式的引水隧洞长于尾水隧洞，中部式的厂房位于中间。中国以礼河三级和四级水电站为有压引水式水电站，利用水头均为 629m。引水式水电站的布置见图。



引水式水电站布置示意图

yinshui suidong

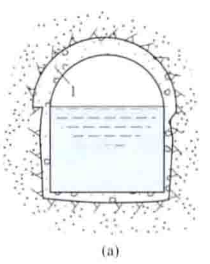
引水隧洞

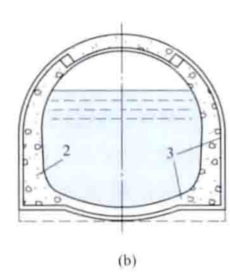
（diversion tunnel） 在山体内开挖而成的引水道。选择洞线时一般要求上下游水流衔接好、洞线短、转弯少，并便于布置施工支洞，同时穿过的围岩地质构造应尽可能简单、稳定、完整，洞线与主要构造等不利结构面的走向应有较大的夹角，夹角不宜小于 30°。为综合满足以上要求，洞线常为曲折状，纵向坡度一般较缓。引水隧洞的经济断面需考虑地质、施工和运行条件，由技术经济综合比较后确定。一般可先假定几个隧洞断面尺寸方案，计算水头损失、出力损失和年电能损失。将各方案的一次投资和正常运行期的年运行费按复利折算到某一基准年，选用计算期内总费用最小的方案。按洞内水流有无自由水面，引水隧洞分无压和有压两种。

无压引水隧洞 断面形状多为圆拱直墙型或马蹄型，见图。断面高宽比一般为 1～1.5。当围岩侧压力小或水位变化较大时，可选择较高的断面。水面至洞顶要留有一定的空间，以避免明、满流交替。

有压引水隧洞 断面形状一般为圆形，承受内、外水压力的性能较好，湿周短，水头损失小。

隧洞衬砌 引水隧洞重要的结构组成部分。其作用包括：①加固围岩，与围岩联合受力；②提高围岩防渗能力；③降低糙率和防止水流长期冲刷而破坏岩体。除岩体坚硬、致密和完整的部位外，一般都要做衬砌，主要有混凝土、钢筋混凝土和喷锚支护 3 种衬砌类型，此外还有预应力混凝土衬砌和钢板衬砌。当围岩较完整、内水压力不大时，可采用混凝土衬砌；当内水压力较大、围岩较差时，应采用钢筋混凝土衬砌；当围岩完整、渗透性小时，可把围岩视为承载结构，不做衬砌或采用喷锚支护。预应力混凝土衬砌具有较高的承受内水压力的能力，这种衬砌可节约钢材，降低造价。中国白山水电站 1 号引水隧洞洞径 8.6m，首次采用灌浆式预应力混凝土衬砌，已安全运行 27 年。隔河岩水电站引水隧洞洞径 9.5m，采用后张法预应力混凝土衬砌，运行情况良好。





无压引水隧洞断面实例

（a）圆拱直墙型；（b）马蹄型

1—混凝土；2—钢筋混凝土；3—受力钢筋

混凝土衬砌在地质条件明显变化处和井、洞及进、出口建筑物交汇处应设变形缝和止水片；围岩条件比较均一的洞段，可设置施工缝。衬砌与岩石之间顶拱部位做回填灌浆。受外水压力控制的隧洞，衬砌顶拱宜设置排水孔，有压隧洞设置排水孔时应注意内水外渗。围岩中是否要做固结灌浆，视其工程地质、水文地质条件和运行条件确定。

Yinggula Choushui Xuneng Dianzhan

英古拉抽水蓄能电站

（Ingula Pumped Storage Power Station） 位于南非自由省与夸祖鲁省边界，为南非第一座抽水蓄能电站，装机容量 1332MW。电力将送往国家电网。

枢纽布置 枢纽工程由上水库、下水库、水道系统、厂房等组成，见图。



英古拉抽水蓄能电站

上水库 大坝为混凝土面板堆石坝，坝顶长 810m，最大坝高 40.9m。总库容 2200 万 m³，有效库容 1930 万 m³。左岸建有一座长 100m 的非常溢洪道，堰顶高程 1740.60m，堰顶宽 8m。

下水库 大坝为碾压混凝土坝，坝顶长 331m，宽 5m，最大坝高 38.6m。溢流堰顶宽 40m，可以抵御 200 年一遇洪水。总库容 2630 万 m³，有效库容 2190 万 m³。

水道系统　工程采用两条引水隧洞，单洞长1030m，内径6.5m，洞内流速5.0～5.5m/s，连接到直径为15m的上游调压室。出调压井后接压力管道，直径为6.35m，总落差396m；后接变直径的压力钢管，总长1200m，采用钢板衬砌，洞内流速8.5m/s，在进入厂房前安装有控制阀门。尾水管直径4.5m，长135m，后接直径为20m的尾水调压井，最后接入尾水隧洞，长2.5km。

厂房　地下厂房长172m、高40m、宽23m，内安装4台单机容量为333MW的可逆式机组，总装机容量1332MW，额定水头441m。水轮机运行工况，机组单机引用流量85m^3/s，出力342MW，效率93.36%；水泵运行工况，机组单机引用流量64～75m^3/s，出力326～359MW，效率93.0%～93.2%。机组额定转速428.57r/min，转轮直径4.139m。

工程施工　工程于2007年11月开工，大坝于2010年11月完工，2011年3月蓄水至正常高水位，计划于2014年全部投入运行，总造价33亿美元。

yingli nengli

盈利能力

(profitability)　用财务内部收益率和财务净现值、投资回收期、总投资收益率和项目资本金净利润率等指标反映的投资获利能力。盈利能力的两个主要指标中，财务内部收益率为动态指标，投资回收期为静态指标。盈利能力的其他动态指标为财务净现值，其他静态指标为总投资收益率和项目资本金净利润率等。

盈利能力分析指标的判别　财务内部收益率应高于电力行业的财务基准收益率，在基准收益率没有明确时，应高于同期银行对电力行业的贷款年利率；投资回收期应低于基准投资回收期和借款偿还期。在中国，资本金的财务内部收益率应高于10%。

财务内部收益率（financial internal rate of return, FIRR）　衡量项目在财务上是否可行的主要评价指标，是项目在计算期内各年净现值累计等于零时的折现率。应分别计算建设项目投资和资本金的财务内部收益率。建设项目投资的财务内部收益率（$FIRR$）和资本金的财务内部收益率（$FIRR'$）的表达式分别为

$$\sum_{t}^{n}(CI-CO)_t(1+FIRR)^{-t}=0$$

$$\sum_{t}^{n}(CI'-CO')_t(1+FIRR')^{-t}=0$$

式中CI为现金流入量（包括销售收入、回收固定资产余值、回收流动资金等）；CO为现金流出量（包括固定资产投资、流动资金、经营成本、销售税金附加等）；$(CI-CO)_t$为第t年全部投资的净现金流量；CI'为现金流入量，同CI；CO'为现金流出量（包括资本金、借款本金偿还、借款利息支付、经营成本、销售税金附加等）；$(CI'-CO')_t$为第t年资本金的净现金流量；n为计算期。

投资回收期（investment recovery period）　项目的净收益抵偿全部投资（固定资产投资和流动资金）所需要的时间。它是考察项目在财务上的投资回收能力的主要静态评价指标。投资回收期（以年表示）一般从建设开始年算起，其表达式为

$$\sum_{t=0}^{P_t}(CI-CO)_t=0$$

投资回收期可根据财务现金流量表（全部投资）中累计净现金流量求得。

投资回收期（P_t）＝累计现金流量开始出现正值年份－1＋上年累计净现金流量的绝对值/当年净现金流量

财务净现值（financial net present value, FNPV）　按行业的财务基准收益率或设定的折现率（i），将项目计算期内各年净现金流量折现到建设期初的现值之和。它是考察项目在计算期内盈利能力的动态评价指标。应分别计算全部投资和资本金的财务净现值。财务净现值可根据财务现金流量表计算求得。财务净现值大于或等于零的项目是可行的。全部投资的财务净现值（$FNPV$）和资本金的财务净现值（$FNPV'$）的表达式分别为

$$FNPV=\sum_{t=1}^{n}(CI-CO)_t(1+i_c)^{-t}$$

$$FNPV'=\sum_{t=1}^{n}(CI'-CO')_t(1+i_c)^{-t}$$

总投资收益率（return on investment, ROI）　表明总投资的盈利水平，系指项目达到设计能力后正常年份的年息税前利润或运行期内年平均息税前利润（$EBIT$）与项目总投资（TI）的比率，按下式计算

$$ROI=\frac{EBIT}{TI}\times100\%$$

式中$EBIT$为正常年份的年息税前利润或运行期内年平均息税前利润。

总投资收益率高于同行业的收益率参考值，表明用总投资收益率表示的盈利能力满足要求。

项目资本金净利润率（return on equity, ROE）　表示项目资本金的盈利水平，系指项目达到设计能力后正常年份的年净利润或运行期内年平均净利润（NP）与项目资本金（EC）的比率，按下式计算

$$ROE=\frac{NP}{EC}\times100\%$$

式中NP为正常年份的年净利润或运行期内年平均净利润；EC为项目资本金。

项目资本金利润率高于同行业的收益率参考值，表明用项目资本金利润率表示的盈利能力满足要求。

yongshui

涌水

(water surge; water burst)　在岩土体中开挖基坑或地下洞室时，地下水涌入场地的现象。涌水多发生在岩溶发育的可溶岩地区（尤其有地下暗河系统）、规模大的断层带或透水性强烈的砂砾层以及基坑下卧有承压含水层等地区。有的涌水渗透通道与地表水、地下暗河或其他含水层有良好的水力联系，具有充沛的水源补给。涌水是工程建设中常遇到的工程地质问题，不仅给施工带来困难，并且也是造成地下洞室围岩失稳、大坝基坑渗透破坏或边坡塌滑的重要原因。如中国锦屏二级水电站引水隧洞施工中，多次发生大量突然涌水，施工受到严重影响。

勘察　在可能有涌水地区修建工程，需要进行工程场地及其毗邻地区的地质及水文地质环境的调查，查明含水层分布、厚度、埋藏条件、渗透性能以及补排关系。在岩溶地区尚需查

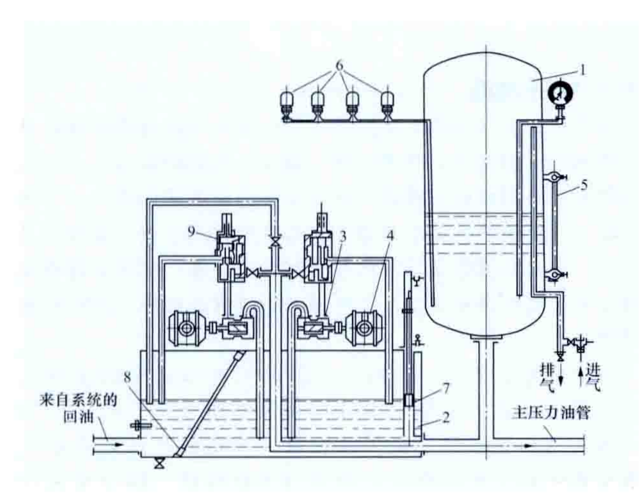
明岩溶发育程度、充填情况、岩溶水的分布及其运动特征等。在分析上述资料的基础上，选用合适的计算方法（如类比外推法、解析法、数值法和水均衡法等）预测基坑或地下洞室可能发生集中涌水的地段和涌水量，并评价涌水对工程的影响。

防治　除采取排水措施降低地下水位外，对于涌水量较大的溶洞、断层破碎带或砂砾层可采取回填封堵、灌浆等措施。

youya zhuangzhi

油压装置

（oil pressure supply unit）　向水轮机调速系统、进水阀、调压阀及其他液压操作元件提供操作用压力油的动力源设备。油压装置由压力油罐、回油箱、油泵及其驱动装置、压缩空气补给装置和保护设备等部件组成，见图。油压装置常用的压力等级有 2.5、4.0MPa 和 6.3MPa。随着机组容量的增大和制造水平的提高，工作油压有升高的趋势。



油压装置系统图

1—压力油罐；2—回油箱；3—油泵；4—电动机；5—油位计；6—压力信号器；7—油位指示器；8—滤油网；9—安全阀组

压力油罐　一般为圆筒形承压容器，用来储存油和压缩空气，其中 30%～40% 的容积为油，其余为压缩空气。压力油罐上还装有用于油泵、自动补气控制的压力信号器和用于监视的油位计等器件。

回油箱　长方形的贮油器，用来汇集调速系统工作后的回油与漏油，并通过油泵向压力油罐供油。回油箱由一个滤油网分隔成污油和清洁油两个油区。回油箱上还装有油位指示器等附件。

油泵及其驱动装置　将油从回油箱压向压力油罐。油压装置一般装设有不少于 2 台齿轮泵或螺杆泵及附件，各油泵互为备用。油泵由异步电动机驱动。主油泵的工作方式有持续运转和断续运转两种。采用持续运转方式时，油泵供给压力油罐的压力油由卸载阀进行切换；采用断续运转方式时，油泵的起停由装在压力油罐上的压力信号器控制。

压缩空气补给装置　由空气电磁阀、油位信号器和压力信号器等元器件组成，用于向压力油罐补充压缩空气，保证压力油罐内正常的油气比例。在水轮机调速器工作过程中，会有一定数量的压缩空气漏掉或溶解于压力油中被带走，因此需要设置压缩空气补给装置向压力油罐补充压缩空气。压缩空气来自水电站压缩空气系统。小型水电站一般用一个手动补气阀进行手动补气，大型水电站采用自动补气。

保护设备　由安全阀构成，当压力油罐内的压力超过由安全阀弹簧预压缩所设定的推力时，安全阀自动打开排油，从而保证压力油罐内的压力不超过允许的最高值，并防止油泵过载。

youxiao dianliang

有效电量

（available energy output）　水电站扣除强迫弃水电量后电力系统利用的年发电量。又称电力系统可吸收电量。设计中通过电力电量平衡求得。

youxiao yingli yuanli

有效应力原理

（principle of effective stress）　作用在土中单位面积上的法向总应力 σ，由土骨架承受的有效应力 σ' 和孔隙流体承受的孔隙压力 u 两者所分担，土的变形和强度由土骨架承受的有效应力 σ' 决定。有效应力原理是土力学中一项重要的基本原理。饱和土体有效应力原理由 K. 太沙基（K. Terzaghi）于 1923 年提出，它为正确确定土的强度、变形和渗透特性奠定了基础。

有效应力　可由总应力和孔隙压力计算而得。对于孔隙中全部充满水的饱和土来说，K. 太沙基给出有效应力表达式为

$$\sigma'=\sigma-u \tag{1}$$

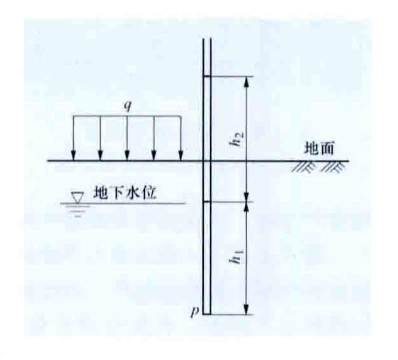
对于非饱和土来说，孔隙中既有水又有气，由于毛细管作用，孔隙水和气中的压力并不相同。A. W. 毕肖普（A. W. Bishop）提出更一般的有效应力表达式

$$\sigma'=\sigma-[u_a-\kappa(u_a-u_w)] \tag{2}$$

式中 u_a 和 u_w 分别为孔隙气和水压力；κ 为系数。孔隙气和水压力虽然已有直接测量办法，但系数 κ 尚难精确测定。若应用式（1）于饱和度大于 80% 的非饱和土，则不至于产生较大误差。

孔隙水压力　孔隙水压力具有两个特点：①孔隙水能承受压应力，不能承受剪应力，因此，作用在土中的剪应力全部由土骨架承担；②孔隙压力沿各个方向都是相同的，而有效应力却可能随着作用方向而变，因此，总应力也是随着作用方向而变的。土体中某一点的有效应力或总应力可用相互垂直的大、中、小主应力来表示。

按产生的原因分，孔隙水压力有外部作用变化所引起的和水的自重引起的两种。图中黏土地基中 p 点在受到外载荷前，它的孔隙压力受地下水位控制，等于 $\gamma_w h_1$，其中 γ_w 为水的容重。在地面上受到外载荷后，测压管水位升高了 h_2，p 点的孔隙压力变为 $\gamma_w(h_1+h_2)$，其中 $\gamma_w h_2$ 值是外载荷引起的，也称超静水压



两种类型的孔隙压力

q—外载荷；h_1—p 点在地下水位以下的深度；h_2—外载荷引起的测压管水位升高

力，是随着时间而逐渐消散的。时间为零时的孔隙压力最大，称起始孔隙压力。这两种孔隙压力的确定原则：外载荷在 p 点引起的起始孔隙压力 $\gamma_w h_2$ 或 Δu 值，取决于 p 点处的总应力增量（可近似采用 $\Delta\sigma_1$ 和 $\Delta\sigma_3$ 计算），以及土的孔隙压力系数 A 和 B，表示为

$$\Delta u = B[\Delta\sigma_3 + A(\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_3)] \quad (3)$$

土体中的总应力增量是通过应力计算确定的。孔隙压力系数在试验室测定，或用弹性理论或弹塑性理论推导确定。饱和土的孔隙压力系数 $B=1$。土的饱和度越低，密度越大，则 B 值越小，甚至接近于零。软土的 A 值大于硬土的 A 值，变化范围为 $-0.50 \sim 0.75$。

无黏性土的渗透系数较大，即使在快速施加的静力荷重下引起的孔隙压力也将很快消散，因此，在无黏性土中以及在固结完成后的黏性土中的孔隙压力受土体表面水头压力控制。在不发生渗流的状态下，p 点的孔隙水压力等于 p 点与地下水位之间的水头压力。

渗透力　孔隙水在土中流动时，水除了对土骨架产生向上的浮力外，还产生沿着水流方向的推动和拖曳力。后者叫渗透力，它等于水力坡降乘水的密度。根据作用在土骨架上的浮力和渗透力可以确定土中的有效应力。这一确定有效应力的方法与式（1）给出相同的结果。

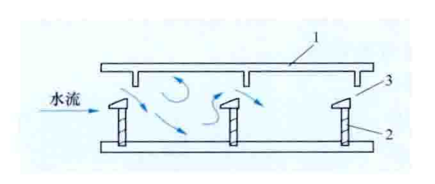
yudao

鱼道　(fish way)

为鱼类通过拦河（闸）坝，克服上下游水位差的一种水道。通常为有洄游生殖或育肥习性的鱼类而设。在过鱼水道中设各式隔板或加糙物，以控制水流流速。利用鱼类的向流习性，用水流诱引鱼类自行沿水道上溯。多用于大江大河上较低水头的水电枢纽工程，具有通过能力大、对鱼伤害小的优点。鱼道由进口、槽身、出口和辅助供水设施等组成。一般鱼道设在水电站尾水附近，有利于鱼类聚集过坝。

类型　包括池式鱼道、槽式鱼道和鳗鱼梯等，应根据过鱼对象的种类和生态习性、工程的闸坝形式、提升高度、地形条件等因素，经技术经济比较选定。

池式鱼道　内部设有各式隔板，将水槽分隔成一系列互相沟通的水池，有时呈阶梯式。有竖缝式、阻流隔板式、变形槽式、水池式等几种类型。其中采用较多的是竖缝式鱼道。竖缝式鱼道是用平板在鱼道槽中形成从上到下的一条竖缝，水流从竖缝中下泄。根据竖缝的布置，分成单缝和双缝两种，单竖缝鱼道见图。



单竖缝鱼道示意图
1—池壁；2—隔板；3—竖缝

槽式鱼道　一条连通上下游的斜槽，槽内沿边壁或底壁设置各种形式的加糙部件，以增加水流阻力，减缓流速，便于鱼类向上溯游。有斜行导水堤、简单槽式、丹尼尔式等类型。

鳗鱼梯　一种专门为鳗鱼过坝设计的鱼梯，大致分为斜槽式、筐笼式和细杆绳索式3类，根据枢纽工程距离河口的里程、幼鳗的个体大小和体力等选择。其中，浅扁的斜槽可适应不同强弱体质的幼鳗，但结构相对较大；筐笼式和细杆绳索式利用了鳗鱼的钻爬习性，其结构简单，适应于体质较强的幼鳗。

发展概况　早在17世纪，世界上就有很原始的鱼道。20世纪以来，水工建筑物的发展对鱼类资源的影响日益突出，因而加快了鱼道的研究和建设。美国20世纪50年代建成的北叉坝鱼道，爬升高度60m，全长2700m；美国帕尔顿鱼道，爬升高度57.5m，全长4800m；巴西伊泰普（Itaipu）水电站鱼道爬升高度约120m，全长达10km，是世界上最高、最长的鱼道。中国鱼道的主要过鱼对象一般为鲤科鱼类和鳗、蟹等幼苗，个体较小，克服流速的能力弱，对复杂流态的适应性较差，故在中国鱼道设计中，对流速和流态的控制要求严格。1958年，富春江水电站首次设置了鱼道，最高水头18m。代表性的鱼道还有吉林珲春河老龙口水利枢纽，鱼道总长约281m，设计水头28m，底坡坡度为1∶16；西江长洲水利枢纽，鱼道总长约1400m，设计水头15m。

yulei zengzhi fangliu

鱼类增殖放流　(hatchery and release of fish)

人为增加鱼类（渔业）资源量，补偿由水电站建设导致的渔业资源遭受的损失，缓和鱼类（渔业）资源的波动。人工增殖放流是补偿水电工程建设对鱼类资源影响的措施之一，即采取人工繁殖的方法培育苗种，投放到自然水域，使其自然生长，补充水域鱼类资源量和自然繁殖群体。鱼类增殖放流通过鱼类增殖站来完成，主要考虑增殖放流目标、放流对象等因素。

增殖放流目标　包括：①满足水电站近期鱼类增殖放流规模要求；②实现中远期鱼类增殖放流任务；③建立水电站环境保护示范工程：鱼类增殖放流站是水电工程重要环境保护工程，在增殖放流站选址、建设和运行过程中，应注重环境保护，使之形成具有一定规模的生态园区和环境保护宣传教育点，创建水电站环境保护示范工程。

增殖放流对象　人工增殖放流主要针对受工程影响、自然繁殖量不足的种类，对于分布区十分狭窄或种群数量很少的鱼类，可以起到较好的补偿作用。此外，对极度濒危的物种或就地保护存在困难的物种，也可在人工增殖站建立人工种群，保存物种种质资源，以便采取迁地保护的措施，恢复自然种群。

综合考虑受工程影响的大小，被列入中国国家级或省级保护动物、被列入《中国濒危动物红皮书——鱼类》、本河段特有鱼类、水域生态系统中的关键物种、重要经济鱼类在本江段的分布情况，人工驯养与繁殖技术等情况确定放流种类。

增殖放流工艺流程　进行野生亲本捕捞、运输、驯养，实施人工繁殖和苗种培育，接受标志（或标记）的技术培训，进行放流苗种的标志（或标记），建立遗传档案，建立并长期维持人工种群，提供苗种放流和进行放流效果监测。鱼类增殖站的配套设施主要有各种室内外鱼池、催产孵化设备，以及人员办公、实验、生活设施，还需要相应的科研技术储备。鱼类增殖站总平面布置见图1，建成后鱼类增殖站实景见图2。

图 1　鱼类增殖站总平面布置图



图 2　建成后鱼类增殖站实景

参考书目

史为良．内陆水域鱼类增殖与养殖学．北京：中国农业出版社，1996.

yulie baopo

预裂爆破　(presplit blasting)　石方开挖时，沿开挖轮廓线钻孔、不耦合装药，在主爆区炮孔起爆前起爆，形成一条具有一定宽度的贯穿裂缝的爆破技术。预裂爆破技术能缓冲、反射开挖爆破的振动波，控制其对保留岩体的破坏影响，使之获得较平整的开挖轮廓，不仅在垂直、倾斜开挖壁面上得到广泛应用，在规则的曲面、扭曲面以及水平建基面等也可采用。预裂爆破技术广泛应用于水电工程的大坝坝肩槽岩石开挖及地下工程的岩石开挖施工中。

预裂爆破的成缝机理与光面爆破相同。预裂面不平整度不应大于 15cm；预裂面上的爆孔痕迹保留率，对于节理不发育完整的岩体，一般不应低于 80%，且炮孔附近岩石不出现明显的爆破裂隙。

预裂爆破的主要内容和特点包括：

(1) 沿设计开挖轮廓线钻孔，先于开挖区主爆破孔起爆。

(2) 孔距与岩石特性、炸药性质、装药情况、开挖壁面平整度要求和孔径大小有关，孔距一般为孔径的 7～12 倍；质量要求高、岩石软弱、裂隙发育时取小值，反之取大值。

(3) 采用药卷直径 (d) 小于钻孔直径 (D) 的不耦合装药结构，不耦合系数 (D/d) 一般取 2～5。

(4) 线装药密度。线装药密度是单位长度炮孔的平均装药量。影响预裂爆破参数的因素很复杂，很难从理论上推导严格的计算公式，主要以经验公式为主，中国较常用公式的基本形式为

$$Q_x = K[\sigma_c]^{\alpha}[a]^{\beta}[d]^{\gamma}$$

式中 Q_x 为预裂孔线装药密度，kg/m；σ_c 为岩石的极限抗压强度，MPa；a 为炮孔间距，m；d 为预裂孔直径，mm；K、α、β 和 γ 为经验系数。线装药密度也可用工程类比法采用经验数据。

(5) 预裂爆破常用的药包结构有连续装药和间隔装药两种。连续装药是比较理想的装药结构，但需使用低爆速、高传爆性的小直径专用药卷，中国通常采用间隔装药的药包形式。为了克服预裂孔底部较强的夹制力，孔底部药量应加大到线装药密度的 2～5 倍。预裂爆破封堵长度一般为 0.8～1.5m。

(6) 为保护保留区的岩体，预裂缝应有一定的超深和超长，一般情况下预裂孔超深值应大于 10～20 倍主爆区药卷直径，超长值应大于 50～100 倍主爆区药卷直径。为防止预裂壁面破坏，离预裂面最近的 1～2 排爆破孔采用缓冲爆破，即减小孔径、抵抗线、孔距和减少装药量。

(7) 预裂孔一般应一次同时起爆，当预裂规模大时，为了减轻预裂爆破过程中的爆破震动影响，可以分段起爆，在同一时段内用导爆索起爆，各段之间用延期雷管控制时差。

(8) 在开挖实践中，大量预裂爆破前，需通过现场试验，确定预裂爆破的各项参数。

yuxiang chuli

预想出力　(expected output)　见水电站额定水头。

yuyingli hunningtu shigong

预应力混凝土施工　(prestressed concrete construction)

在混凝土结构承受外部载荷之前，通过张拉高强钢筋、钢丝、钢绞线使混凝土预先受到一定压应力的施工技术。预应力可提高混凝土结构的抗拉能力，提高构件的耐疲劳性能。在水工建筑物中，预应力混凝土常用于坝上交通桥梁、厂房吊车梁、受力较大的闸墩等，也可用于加固坝体。

材料特性　混凝土的抗拉强度相对较低，只有抗压强度的 1/13～1/10，为此，通常在受拉区配置钢筋，成为钢筋混凝土结构。承受载荷以后，一般在受拉区混凝土开裂已达到允许限度时，钢筋的抗拉能力还没有充分发挥。为充分发挥钢筋的抗拉和混凝土的抗压能力，事先将钢筋张拉到一定应力值，待混凝土达到规定的强度后，放松被张拉的钢筋。这时钢筋产生弹性回缩，由于被混凝土锚固，其回缩力传给混凝土，使受拉区的混凝土预先受到一定压应力。这样，在结构物受到外部载荷作用时，其受拉区的拉应力首先要抵消预压应力，这就推迟甚至避免了裂缝的产生，同时可节约钢筋和水泥。

施工方法　按照施加预应力的时间，分先张法和后张法。先张法是在浇筑混凝土以前把钢筋按要求张拉到规定的控制应力值，用夹具将其临时固定在台座或钢模上，然后浇筑混凝土，直到混凝土达到一定强度后，再将张拉的钢筋放

松。后张法是在浇筑混凝土以后再张拉钢筋，一般在配置预应力钢筋的部位预先留出孔道，待混凝土达到规定强度后，再将钢筋穿进去，张拉到规定的控制应力值，用锚具将其两端固定，再在预留孔道内灌入水泥浆或水泥砂浆，最后放松钢筋的张拉力。张拉的方法，一般分机械张拉、电热张拉和化学张拉。机械张拉采用千斤顶、卷扬机等机械设备拉伸钢筋。电热张拉是在钢筋上通电使之热胀伸长。化学张拉是用膨胀水泥配制混凝土，混凝土在硬化过程中体积膨胀，迫使钢筋伸长。这种靠混凝土自身膨胀而产生的预应力，通常称为自应力，多用于环形构件，如水泥压力管等。

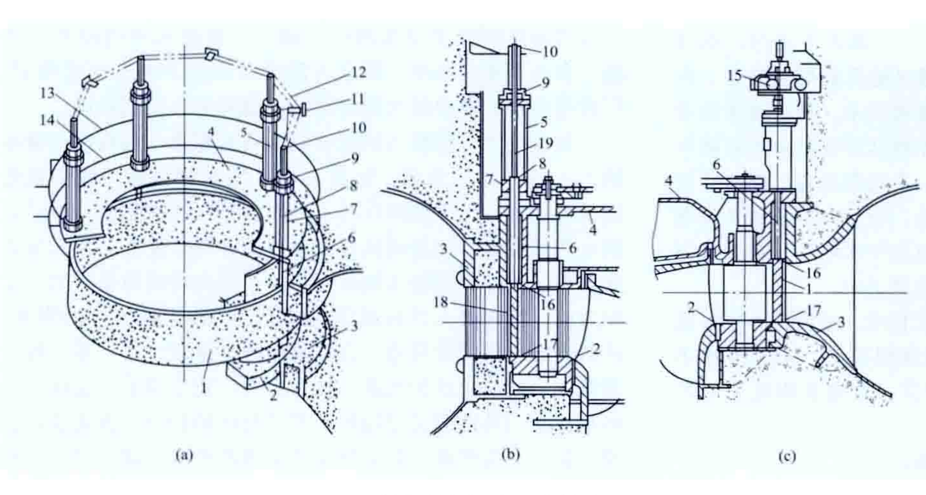
yuantongfa

圆筒阀 （cylindrical valve） 设在水轮机固定导叶和活动导叶之间，呈圆筒形，用来截断过机水流的水轮机部件。水轮机圆筒阀可动水开启和关闭，具有水力损失很小、基本不占厂房面积的特点，但水轮机装设圆筒阀使其顶盖结构和受力状态变得复杂。水轮机圆筒阀的主要功能是减少机组停机时漏水，进而减小导叶间隙空蚀和磨损，也可作为机组防飞逸措施之一。与装设进水阀相比，水轮机圆筒阀不具备为水轮机提供全面检修条件的功能。中国采用水轮机圆筒阀的水电站主要有漫湾、小浪底、大朝山、瀑布沟、小湾、锦屏一级、糯扎渡、溪洛渡等，其中瀑布沟水电站水轮机圆筒阀外径为9348mm。水轮机圆筒阀结构见图。

活门　呈圆筒形，其挡水高度等于导叶高度，关闭时圆筒下表面紧压在底环表面密封，上部和座环或顶盖密封，上下密封采用硬度很高的橡胶条，开启时整个圆筒升到座环和顶盖之间的环形空间内，圆筒下表面和上抗磨板齐平，不影响水流，水力损失几乎为零。活门可用铸钢或厚钢板卷制后加工而成，尺寸较大时进行分瓣。

机械同步控制方式　圆筒形活门上部沿圆周均布4～6根具有一定韧性的高强度不锈钢操作杆，通过密封装置伸出顶盖和各自的操作机构连接。在操作机构顶部有链轮，用链条将4～6个操作机构互相啮合，同步转动，见图（a），以保证整个活门上下移动。操作机构分液压马达操作和直缸接力器操作两种：①直缸接力器的活塞直接带动活门上下，活塞通过内部的行星螺杆将活塞的直线运动转变为中心螺杆的回转运动，中心螺杆上端的链轮通过同步链条使各中心螺杆同步回转。这种操作方式的圆筒阀活门不能自锁，全开时接力器开腔要始终保持一定油压，否则油压降低活门有自行下落的危险，关阀时活门上下水压差和自重使其有自关闭趋势；全关时活门内圆和顶盖密封，上腔的水压将活门紧压在底环密封橡胶条上。直缸接力器驱动油压较低，耗油量少，见图（b）。机械同步方式适用于尺寸和质量小的筒形阀，过去采用得较多。②液压马达操作机构的每个液压马达带动一个螺母，螺母的回转使带螺纹的操作杆上下移动带动活门上下，同时又带动同步链轮链条运动，保证几个液压马达同步回转，见图（c）。

电液同步控制方式　圆筒阀电液同步控制系统主要由电气和机械两部分组成，其中电气部分包括可编程控制器（PLC）及其配套的A/D模块、圆筒阀接力器位移变送器、压力变送器、位置开关、信号功率放大板、电源、操作开关、按钮以及信号灯、人机界面等，机械部分包括圆筒阀本体、圆筒阀接力器、液压控制阀组、电磁阀、同步分流器、液压比例阀以及相关管路和阀门等。电液同步控制系统的作用是保证圆筒阀在提升和下降过程中的倾斜度，让其调整在规定的误差范围内，同时维持液压系统的油压工作正常。圆筒阀控制系统接收远方计算机监控系统的命令，开启、关闭或保持圆筒阀；另外，圆筒阀控制系统状况、圆筒阀位置信号和圆筒阀系统故障信号均可发送到远方计算机监控系统，并在现地指示。



圆筒阀及其驱动机构图

（a）圆筒阀；（b）直缸接力器驱动；（c）液压马达驱动

1—活门；2—底环；3—座环；4—顶盖；5—直缸接力器；6—操作杆；7—活塞；8—行星滚子螺母；9—止推轴承；10—链轮；11—拉紧链轮；12—链条；13—上油管；14—下油管；15—液压马达；16—上密封；17—下密封；18—青铜导轨；19—中心螺杆

yunshu jixie

运输机械 （transportation machinery） 用于输送料物的机械设备。按其运行条件，运输机械分为陆上运输机械、水上运输机械和空中运输机械，其中陆上运输机械又分为无轨运输机械、有轨运输机械、连续运输机械3类。水电工程施工中以陆上运输机械为主。

无轨运输机械　包括各种载重汽车、自卸汽车、拖车、工程专用汽车等。

（1）载重汽车。通常用来运载货物的汽车，其载重量一般为2～18t，2.5t以下为轻型车。

（2）自卸汽车。依靠液压油缸举升的顶推作用，将金属车厢向一侧举起，把所载物料自行倾卸的汽车。它具有车身坚固、机动性与越野性能好、爬坡能力强、卸载速度快等特点，在水电工程施工中广泛采用。中国水电工程采用的最大的自卸汽车总重达148t，额定载重量85t；世界上最大的自

卸汽车总重量达639t，主要用于矿山。

自卸汽车按车厢倾卸方式分，有后卸式、侧卸式、三面倾卸式及底卸式4种；按用途划分，有普通型与矿山型两种；按总重（自重+载重）划分，小于10t为轻型车，10～30t为重型车，30t以上为超重型车。

（3）拖车。用来完成普通载重汽车无法完成的一些大型设备和构件运输的大型平板拖车组，它由牵引汽车（又称拖车头）和挂车两部分组成。水电工地常用的拖车载重量为20～600t。牵引汽车是由载重汽车专门改装而成的变型汽车，用于牵引载货挂车或其他不带动力装置的机械和设备。挂车俗称拖板，由牵引汽车拖带行驶，实现大吨位、长距离的公路运输。牵引汽车与挂车的连接形式有半挂型与全挂型两种。半挂型的牵引汽车设有鞍型牵引装置与半挂车连接，以传递牵引力和承担半挂车的部分重量。半挂型拖车的载重量一般为20～200t；全挂型的牵引汽车是通过牵引钩与全挂车连接并传递牵引力，牵引汽车本身不承担挂车的重量。全挂型拖车的载重量一般为20～600t。

（4）工程专用汽车。在通用载重汽车的底盘上装置特种设备，以适应专门用途的汽车。例如，散装水泥车是专为运输散装水泥和粉煤灰而设计改装的专用汽车。其装灰金属罐体有立式和卧式两种，以卧式居多，单车载重4.5～40t。按其卸料方式的不同，可分为倾卸式、机械卸料式和压气卸料式3种。前两种只能将水泥卸入停车面以下或稍高于停车面的受料漏斗或料仓内，后一种则可将水泥送到一定距离和一定高度的水泥库内，是采用最多的卸料方式。常用的工程专用汽车还有油罐车、洒水运水车、混凝土搅拌车、混凝土泵车等。

有轨运输机械　包括内燃机车、电气机车、蓄电池机车等牵引机车及各种有轨运输车辆。

有轨运输有标准轨距铁路与窄轨铁路两种，中国标准轨轨距为1435mm，窄轨轨距有1000、762、600mm等几种。

标准轨运输车辆有平车、敞车、棚车、自卸矿石车、散装水泥车及罐车等，还有专门运输重大件的特种运输车。其中，自卸矿石车是车体借助压缩空气及倾翻机构的作用，向一侧将货物卸出，车辆倾翻角一般为45°。水电工程中常用来运输砂石料等建筑材料，一般载重量为60t。

窄轨运输车辆有平车、固定车厢式矿车、V形及U形翻转式矿车、曲轨侧卸式矿车、双向侧卸式矿车及梭式矿车等多种。梭式矿车由机车牵引，其槽形厢体内装有刮板输送机，它可将首部接收的渣石逐步推移到尾部，直至装满整节厢体，运至卸料地点，再次开动刮板机，厢体内的渣石可全部从尾部卸出，是中小型隧洞掘进采用有轨运输的一种高效出渣设备。

连续运输机械　包括各种类型的带式输送机、螺旋输送机、斗式提升机、架空索道和管道气力输送设备等。

yunxing kongzhi shuiwei

运行控制水位　(operation control level)　为满足水库库区及枢纽特定要求设置的坝前实时控制运行水位。为减少库区淹没损失而设置的运行控制水位为库区防洪运行控制水位；为提高排沙率，降低水位以减少库尾的淤积，长期保持调节库容、降低淹没影响回水位而设置的运行控制水位为排沙运行控制水位。有时为了减少汛期降低水位所带来的发电损失，在汛期小流量、小来沙的情况下动态控制水位，减少水位减低的程度。

运行控制水位设置　运行控制水位可根据洪水或水沙特性进行分时段、分流量多级控制。运行控制水位的运行时段及分级流量，应根据年内各时段洪水或水沙特性、水库回蓄、发电影响、水库淹没等综合分析后确定，必要时应进行技术经济比较。设置运行控制水位，还应分析的内容有：①对水轮机额定水头等参数和运行工况、制造难度的影响；②对电站容量效益的影响；③对枢纽布置、泄流能力的要求及影响；④对其他综合利用部门用水的影响。

运行控制水位选择　在汛期流量较大时降低或控制水位运行，可有效降低库区淹没损失或减少水库泥沙累积性淤积，但同时也会带来发电损失。运行控制水位的选择应综合考虑库区淹没损失、发电及综合利用效益和调节库容要求等因素，进行综合技术经济比较。



zaojia zhishu

造价指数

（cost index） 说明不同时期工程造价的相对变化趋势和程度的指标。表示某一时期的工程造价比另一时期工程造价上升或下降的百分比。是工程造价动态结算的重要依据。

中国水电工程造价指数是根据行业的有关规定和办法，参考国际通用方法，针对国内建设的大中型水电工程进行测算的。造价指数综合反映了全国和不同地区大中型水电建设项目工程投资随国家政策及外部市场情况的变动趋势和程度的相对数。

一般按建筑安装工程费、设备费、独立费用等分别编制造价指数，再综合成工程综合造价指数。

建筑安装工程费造价指数分为土石方工程、混凝土工程、钢筋制安工程、基础处理工程、设备安装工程等分类造价指数；各分类造价指数中包括直接工程费和间接费造价指数，直接工程费中包括人工费、材料费、机械使用费、其他直接费等指数。

建筑安装工程分类造价指数（R）测算常用的公式是

$$R=B_L\frac{L}{L_0}+B_E\frac{E}{E_0}+B_F\frac{F}{F_0}+\cdots+B_J J+B_N N$$

式中 B_L、B_E、B_F、B_J、B_N 为变值权数，指各分类工程中人工、主要材料、施工机械折旧、其他费用的权数；L_0、E_0、F_0 分别为基价期人工预算单价、施工电价以及柴油、钢筋、水泥、木材、炸药等主要材料的预算价格；L、E、F 分别为价差结算期人工预算单价、施工电价以及柴油、钢筋、水泥、木材、炸药等主要材料的预算价格；J 为施工机械折旧费价格系数；N 为其他费用价格系数。

设备费和独立费用造价指数测算方法基本相同。

Zhage'ersike Choushui Xuneng Dianzhan

扎戈尔斯克抽水蓄能电站

（Zagorsk Pumped Storage Power Station） 位于俄罗斯莫斯科市西北70km。电站装机容量1200MW，用长15km的500kV超高压输电线路接入莫斯科地区电力系统。电站投入后，代替原先的调峰火电机组，每年可节约标准煤40万t。

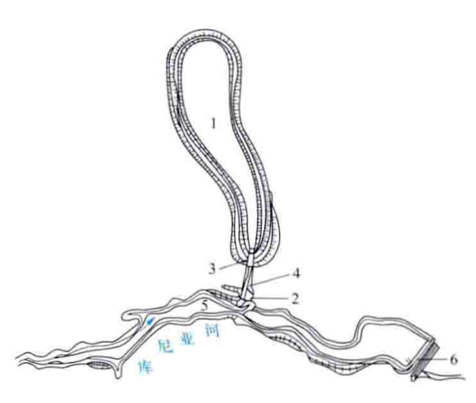
枢纽布置 枢纽工程由上水库、下水库、水道系统、厂房等组成，见图。

上水库 修建在库尼亚（Кунья）河岸边的高台地上。台地由白垩系未胶结的砂层、黏土层和砂质黏土层组成。利用半挖半填方式，修筑围堤形成上水库，围堤长9000m，最高35m。水库最高蓄水位165.50m，相应库容2970万m³，最低蓄水位156.50m，调节库容2200万m³，工作深度9m。

下水库 建在库尼亚河上，壅高水位22m，最高蓄水位62.50m，相应库容3320万m³；最低蓄水位52.50m，调节库容2200万m³，工作深度10m。

水道系统 进水口布置在上水库的东岸，其后设6条长730m的钢筋混凝土压力管道，管道内径7.5m。

厂房 地面厂房内装6台单机容量200MW的立轴单级可逆式混流机组。水泵水轮机转轮直径6.3m。发电工况时，转速150r/min，额定水头100m，最大水头113m，额定容量205MW。水泵工况时，额定扬程96m，相应抽水流量170m³/s，额定输入功率217MW，最大扬程115m。发电电动机为伞式，额定电压15.75kV，额定容量236MW；采用晶闸管励磁；发电工况的效率为0.85，抽水工况的效率为0.95。



扎戈尔斯克抽水蓄能电站枢纽平面布置图
1—上水库；2—厂房；3—进水口；4—压力管道；5—下水库；6—库尼亚河下水库坝

工程施工 电站于1975年开工，1988年开始发电。

主要工程量：土方开挖1934万m³，土方填筑2068.7万m³，石方填筑87万m³，混凝土浇筑70万m³，金属结构安装12760t。

zhamen

闸门

（gate） 用于开启或关闭水工建筑物流道过水孔口，以控制水流的挡水设备。常用于泄水、输水、通航、导流等建筑物。闸门由门叶和埋件两部分组成。门叶为活动部分，一般包括结构件、支承件和水封装置三部分；埋件为埋设在混凝土中的构件，以将门叶所承受的荷载传递至混凝土结构，并在门叶启闭时起导向作用，与门叶的水封装置相配合，使孔口四周形成密封。

按闸门的工作性质，可分为工作闸门、事故闸门、检修闸门和封堵闸门。工作闸门用于水工建筑物流道过水孔口的正常挡水或开启运行，一般能在动水中启闭。事故闸门用于其保护的流道或设备出现事故时，在动水中关闭孔口，避免事故扩大，一般在静水中开启；要求快速关闭的事故闸门，也称快速闸门。检修闸门用于水工建筑物和设备等检修时挡水，一般在静水中启闭。封堵闸门常用于施工导流孔口的封堵，一般在一定的水头条件下一次性动水关闭。

按闸门挡水面体型和门叶结构形式，可分为平面闸门、弧形闸门、扇形闸门、圆筒闸门等。

按闸门关闭时门叶顶部与设计水位的相对位置，可分为露顶式闸门和潜孔式闸门。

按在库水位下设置的深度，可分为表孔闸门、中孔闸门

和深（底）孔闸门。

按闸门制作材料的不同，有钢闸门、钢筋混凝土闸门、铸铁闸门及木闸门等。

按闸门所在水工建筑物的类型，有泄水建筑物的闸门、输水建筑物的闸门、通航建筑物的闸门以及施工导流建筑物的闸门等。

泄水建筑物的闸门　泄水建筑物一般设置有工作闸门，有时要求闸门能局部开启调节泄水流量。常用的门型有平面闸门和弧形闸门等。通常需在潜孔式工作闸门上游设置事故闸门，在露顶式工作闸门上游设置检修闸门或事故闸门。如果事故闸门上游需要检修的流道较长，还可考虑在流道进口设置检修闸门。

输水建筑物的闸门　在进水口一般设置事故闸门，但在压力明管前端及部分情况下的水轮机进口，需设置快速闸门，用于发生事故时紧急关闭。在快速闸门上游应设置检修闸门。在水轮机尾水管出口需设置检修闸门或事故闸门，用于检修时挡水或发生事故时动水关闭孔口；当尾水管后接有较长尾水隧洞时，其出口也需设置检修闸门。

通航建筑物的闸门　船闸的上下闸首通航孔口设有工作闸门，通常在静水条件下启闭；在船闸输水廊道设有充、泄水工作闸门，一般为动水开启、静水关闭，有事故保护要求时，则要求动水启闭。由带水承船厢载运船舶过坝的湿运升船机的上闸首应设置上部带通航工作闸门的组合式挡水工作闸门，湿运全平衡式垂直升船机的下闸首也应设置上部带通航工作闸门的组合式挡水工作闸门，通航工作闸门为静水启闭，挡水工作闸门为动水启闭。各工作闸门的上、下游应设检修闸门。

施工导流建筑物的闸门　供导流、截堵导流孔口用。

zhayao

炸药 (explosive)

在一定外界能量（加热、摩擦、撞击）作用下，能由其本身的能量使其物态瞬间改变，同时释放大量热能和产生大量气体，对周围介质做功并伴随声、光等效应的物质。在水电工程建设中，较常用的工业炸药有乳化炸药、铵梯炸药和铵油炸药。但由于铵梯炸药中含有梯恩梯成分，中国已于2008年起停止生产铵梯炸药。炸药按用途分为起爆药、猛性炸药和发射药。

起爆药　起爆药的特点是极其敏感，受外界较小能量作用立即发生爆破反应，反应速度在极短时间内增长到最大值。工业上通常用它来制造雷管，用以起爆其他类型的炸药。最常用的起爆药有二硝基重氮酚［$C_6H(NO_2)_2N_2O$，简称DDNP］、雷汞［$Hg(CNO)_2$］、叠氮化铅［$Pb(N_3)_2$］等。其中，DDNP由于原料来源广泛、生产工艺简单、安全性好、成本低、具有较好的起爆性能，是雷管使用的主要起爆药。

猛性炸药　工业和军事中用途最广的炸药，一般都在较大冲能作用下才能爆轰，具有相当大的稳定性。在工程爆破中多用雷管或其他起爆器材起爆。

工业中常用的猛性炸药有单质猛性炸药和混合炸药两类：①单质猛性炸药，化学成分为单一化合物，如梯恩梯［三硝基甲苯，$CH_3C_6H_2(NO_2)_3$，简称TNT］、黑索金［环三亚甲基三硝胺，$(CH_2NNO_2)_3$］、特屈儿［三硝基苯甲基硝胺，$C_6H_2(NO_2)_3NCH_3NO_2$］、硝化甘油［丙三醇三硝酸酯，$C_3H_5(ONO_2)_3$］和液氧炸药等。②混合炸药，由两种或两种以上独立的化学成分组成的爆炸性混合物，常用的有以硝酸铵为主要成分与可燃物混合而成的混合物，释放的能量比起爆药大。工业上常用的有粉状硝铵类炸药（如铵油炸药、膨化硝铵炸药、粉状乳化炸药等）和含水硝铵类炸药（如乳化炸药、水胶炸药、重铵油炸药）等。混合炸药是工程爆破中用量最大的炸药，在水电工程开挖爆破中广泛应用。

发射药　特点是对火焰极其敏感，可在开敞的环境下燃爆，而在密闭条件下爆炸威力很弱。吸水能力强，吸水后敏感性大大降低。常用的发射药为黑火药，它可用于制造导火索和矿用火箭弹。黑火药是古代中国四大发明（指南针、火药、造纸术、印刷术）之一，长期以来，广泛应用于军事和工农业生产建设，对人类文明起到很大的推动作用。

Zhanghewan Choushui Xuneng Dianzhan

张河湾抽水蓄能电站 (Zhanghewan Pumped Storage Power Station)

位于中国河北省石家庄市井陉县境内的甘陶河干流上，距石家庄市直线距离53km，见图1。电站装机容量1000MW。以1回500kV出线接入河北省南部电网。



图1　张河湾抽水蓄能电站

枢纽布置　枢纽工程由上水库、下水库、水道系统、厂房、下水库拦沙坝（续建加高）与垭口排沙明渠等组成，见图2。

上水库　位于张河湾水库左岸山顶，库址为一古夷平面高悬台坪，台面平缓起伏，台坪出露寒武系馒头组薄层灰岩、泥岩及粉砂岩和大红峪组石英砂岩及铁质砂岩，均为单斜缓倾（6°～10°）层状结构。通过开挖和填筑堆石围坝成库，总库容770万m^3，调节库容715万m^3，正常蓄水位810.00m，工作水深31m，最大水深52.5m。坝顶高程812m，上游

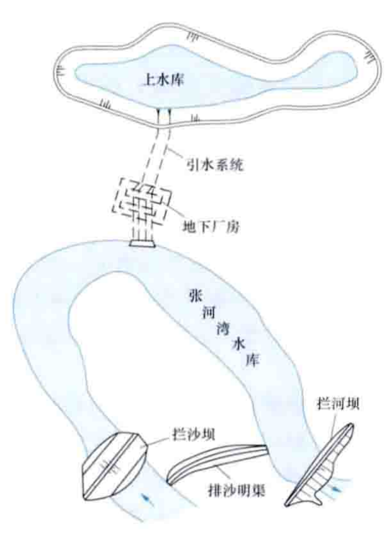


图2　张河湾抽水蓄能电站枢纽布置图

坝坡坡度为 1∶1.75，下游坝坡坡度为 1∶1.5。库顶轴线长 2842.9m，坝轴线处最大坝高 57m。坝坡和库底采用沥青混凝土面板全库防渗，沥青混凝土面板采用简化复式断面，防渗总面积 33.7 万 m^2。

下水库　坝址以上流域面积 $1834km^2$，多年平均年径流量 1.4 亿 m^3，100 年一遇设计洪水流量 $4570m^3/s$，1000 年一遇校核洪水流量 $8570m^3/s$。下水库拦河坝利用未完建的浆砌石重力坝加高而成，原坝高 54m，为浆砌石坝，顶部高程 466.65m。加高部分采用毛石混凝土，坝顶高程 490.00m，最大坝高 77.35m，坝顶长 430m。正常蓄水位 488.00m，总库容 8330 万 m^3。大坝加高后，保留原排沙底孔和两个泄水底孔，另增设 4 个泄洪中孔和 4 个泄洪表孔。

下水库拦沙坝与垭口排沙明渠　下水库所在甘陶河为多沙河流，多年平均入库沙量为 103.0 万 t，其中推移质为 22.7 万 t，多年平均含沙量 $11.1kg/m^3$。根据河流弯段地形，修建拦沙坝，开挖垭口排沙明渠，使河流“裁弯取直”，以利排沙和减少电站进/出水口处的淤积和过机泥沙。布置在垭口排沙明渠进口下游 200m 处，为无防渗要求的堆石坝，坝顶高程为 481.00m，高于 100 年一遇设计洪水位 0.5m，坝顶长度 381m，最大坝高 38.65m。

水道系统　由上水库和下水库进/出水口、压力管道、尾水隧洞等组成，长约 850m，不设调压井。上水库和下水库进/出水口均为岸边式。引水系统一管两机布置，高压管道为竖井式，全部采用钢板衬砌。尾水系统采用一洞一机布置，与机组中心线的夹角为 83°，4 条尾水隧洞平行，洞径 5.0m，钢筋混凝土衬砌。

厂房　地下厂房，包括主、副厂房，主变压器室，母线洞，交通洞，通风洞，出线竖井和排风竖井。厂区为变质安山岩，岩性单一完整、构造简单，地下厂房采用喷锚支护。主厂房开挖尺寸为 151.55m×23.8m×50.8m（长×宽×高），机组安装高程 416.00m。主变压器室与主厂房平行，在主厂房下游 46.15m 处，开挖断面为 117.39m×17.8m×28.8m（长×宽×高），主变压器室上部为 GIS 开关室。

厂房内装有 4 台单机容量为 250MW 的单级混流可逆式水泵水轮机。水轮机额定水头 305m，额定转速 333.3r/min，转轮直径 4.61m，单机发电引用流量 $94.1m^3/s$，额定出力 255MW。水泵工况最大扬程 350.8m，相应出力 225MW，抽水流量 $61.5m^3/s$，吸出高度-48m；最小扬程 294.96m，相应出力 268MW，抽水流量 $80.5m^3/s$。发电电动机额定容量 278MV·A/268MW。主变压器 4 台，有载调压，容量均为 300MV·A。水泵工况采用变频起动，设 1 台变频起动装置，背靠背起动作为备用。发电电动机与主变压器采用单元接线，主变压器 500kV 高压侧为四角形接线，采用 GIS 配电装置，出线由管道母线经竖井引至地面 500kV 出线场。

工程施工　工程于 2003 年 12 月开工，2008 年 7 月第一台机组投产发电，2009 年 2 月 4 台机组全部投产发电。

主要工程量：土石方明挖 1089 万 m^3、洞挖 50 万 m^3，堆石填筑 658 万 m^3，混凝土浇筑 48 万 m^3，沥青混凝土 11.3 万 m^3，金属结构及安装 2454t。

设计单位　中国水电顾问集团北京勘测设计研究院。

建设单位　国网新源控股有限公司河北张河湾蓄能发电有限责任公司。

zhezhou

褶皱　(fold)

在构造应力作用下岩层产生连续永久性弯曲变形。大的褶皱范围可达数十到数百公里，而小的褶皱则可出现于手标本上。褶皱的基本单元为背斜和向斜，见图 1。背斜岩层向上拱曲，核部岩层较老，两翼岩层较新；向斜反之。多个背斜和向斜的组合形态称复式褶皱。此外，有的褶皱在主褶皱内还发育多个次级褶皱。



图 1　褶皱

褶皱要素　包括核、翼、枢纽线、转折端、轴面等要素，如图 2 所示。

(1) 核。褶皱的中心部位。

(2) 翼。核的两侧岩层。

(3) 枢纽线。褶皱的同一层面上各最大弯曲点的连线，枢纽线可以是直线，也可以是曲线，其产状即为褶皱的倾伏产状，由方位角和倾伏角来确定。

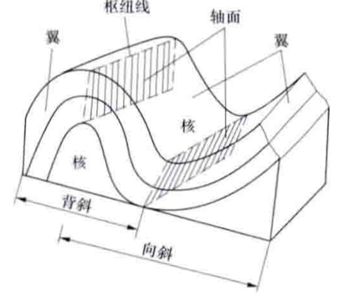


图 2　褶皱要素示意图

(4) 转折端。从一翼向另一翼过渡的部分。在横剖面上，转折端常呈弧线。

(5) 轴面。连接褶皱各层的枢纽线所构成的面，其产状由走向、倾向和倾角来确定。

褶皱分类　主要按褶皱形态、轴面和枢纽线产状分为开阔褶皱、紧密褶皱、箱状褶皱、圆弧褶皱、直立褶皱、倒转褶皱、平卧褶皱、水平褶皱和倾伏褶皱等。

褶皱的工程地质性质　褶皱发育区通常伴生有断层、裂隙、层间错动等地质构造，工程地质条件较复杂。一般说来，褶皱轴部张性构造发育，岩体较破碎，多为透水区或富水区。就硬岩而言，褶皱核部残余构造应力值较大，对地下工程轴线的选择及工程边坡的稳定有影响，地下洞室轴线或坡面走向宜与褶皱轴向大角度相交；背、向斜核部岩体多挤压破碎，对地下工程围岩稳定不利，多为稳定性较差或不稳定，渗水严重，尤其向斜核部地下水富集容易发生涌水。层间错动使层面物质的工程性质恶化，常构成滑动面，是工程地质勘察中需要注意的问题。

zhenxi dongwu jiuhu

珍稀动物救护　(rare animal rescue)

对因水电站施工、水库淹没和电站运行造成影响的珍稀保护动物采取及

时救治、孵化、饲养、野化训练并进行放生的生态保护措施。珍稀动物救护可以使受水电工程建设影响的野生动物得到有效救护，有利于维护区域野生保护动物的种群数量和区域生物多样性。

救护对象　受水电工程施工、场地清理、水库蓄水淹没和电站运行影响的珍稀保护动物的幼小个体（包括鸟类、两栖爬行类的蛋、卵），或老、弱、病、残、伤而不具备快速回避施工扰动或库水上升能力的动物。

救护时间　珍稀动物救护贯穿于水电工程施工和运行阶段，需在工程建设和水库库底清库前对征地范围进行普查，调查该区珍稀动物的主要种类、数量、动态分布等特征，明确搜救实施方案及要求。结合水库蓄水前的清库作业时序，按救护实施方案进行动物搜救。

野外搜救　搜救过程中应配备兽医师、动物保护专业人员、饲养师、搜救人员以及野生动物救护车辆，以及药品、普通手术器械、麻醉箱、简易笼舍等基本设备。搜救方法主要有食物诱导、收容救助。对发现的搜救对象进行记录，记录内容包括救护对象的基本情况、位置、生境、照片或录像，记录原始资料及时备案存档。搜救运输过程中需防止野生动物逃逸或伤人，小型动物和鸟类多采用遮光运输，两栖爬行类采用淋水湿运方式，同时进行运输车辆和工具的消毒和安全防范。

野化训练　被救护动物经过治疗和饲养后，为帮助其适应野外生存，让其脱离人工饲养驯化后，需开展野化训练，使其恢复救护前的习性。

放生　救护动物在恢复健康或达到放生条件时进行放生。动物放生要进行动物检疫，选择适宜的放生生境、标志放生。

珍稀动物救护站　珍稀动物救护站是珍稀动物救护的具体设施，一般包括办公区、动物救护区及饲养区、动物野化区。由于各类野生动物习性的差异，动物救护及饲养区分设隔离区、两栖爬行类救护饲养区、鸟类救护饲养区、哺乳类救护饲养区。

zhenxi zhiwu qiandi baohu

珍稀植物迁地保护　(rare plant off-site conservation)

对因电站施工和水库淹没受影响的珍稀保护植物，选择条件相似的生境，采取迁移或引种的方式加以保护的一种生态保护措施。迁地保护为受水电站建设影响的珍稀保护植物提供了重新生存的机会。

迁地保护原理　珍稀植物迁地保护主要是以生物-生态学为基础。在进行植物迁地保护时，必须遵循植物的遗传变异规律，以及气候相似、生境相似和群落生态学的原理，以保证迁地保护植物的正常生长。

迁地保护对象　主要针对因电站施工占地和水库淹没而受影响的珍稀、保护、濒危和当地的特有植物。

迁地保护方式　有植物整体迁地保护、种子和组织迁地保护和基因库保存三种方式。

植物整体迁地保护　使植物的整个植株脱离其天然的生境，用人工的方法在异地繁殖并栽培。水电站珍稀植物保护地点主要有电站珍稀植物园或周边已有植物园、树木园林、标本园、专类区。

植物迁地保护先对电站建设范围内进行详细的调查，记录珍稀植物的坐标、测树因子、生活力和生境，标明可能采取的移植方法，再对珍稀植物进行挖掘、运输、定植、养护与管理、病虫害防治。

种子和组织迁地保护　珍稀保护植物因交通条件、树木较大等不适宜采取活体移栽的方法，是在人工条件下保存种子、孢粉、器官和组织等使植物种类及其遗传基因得到延续，为未来培育计划服务。该保护方法主要有种子贮藏和组织培养两种。

基因库保存　对珍稀保护植物的叶片或其他组织基因进行提取、分离和保存。水电站基因库保存主要委托具有种子基因库的相关科研机构进行保护，使不能移栽保护的珍稀保护植物基因得到有效保护。

参考书目

许再富．稀有濒危植物迁地保护的原理与方法．昆明：云南科技出版社，1998.

zhenchong

振冲　(vibroflotation)

利用机械的强烈振动和压力水的共同作用加固软弱地基的工程技术。振冲加固几乎适用于各类土层，主要优点是施工机具简单、操作方便、加固质量易于控制、施工速度快、造价较低。

分类　振冲分为振冲密实法和振冲置换法两种。

(1) 振冲密实法。适用于加固松散砂基，有无填料加固和填料加固两种振冲密实施工方法，依地质条件和加密要求而定，可以有效地提高砂基的承载强度和相对密度，防止液化。施工实践中多采用填料加固方法。

(2) 振冲置换法。适用于加固软弱黏性土、黄土、人工填土等地基，在振孔中填入碎石等无凝聚性的粗粒料，形成桩柱，与原地基土组成复合地基，可以提高地基承载强度，减少沉降，增加稳定性。填料应有良好级配，不要使用单级配料。

施工工艺　振冲施工一般采用辅以压力水冲的湿法振冲，有利于造孔和加密，还能对施工振冲器起到冷却作用，保证机具正常运行。振冲施工一般包括造孔、清孔、填料、加密4个工序。主要施工机具为振冲器，其类型通常按电动机功率划分为13、30、55、75、110、130、150kW等多种。中国常用的是30kW和75kW振冲器。

使用30kW振冲器加固施工时，其额定电流为60A，加密电流常控制为45～55A。碎石填料粒径一般为2～8cm。使用75kW振冲器加固施工时，其额定电流为150A，加密电流常控制为75～95A。碎石填料粒径一般为3～12cm。

质量控制　主要有桩位偏差、成桩深度、填料质量和数量、技术参数的控制，以及桩体密实度和桩间土加密效果的控制等。

技术参数控制通常采用加密电流控制、填料量控制，以及加密电流值、填料量和留振时间的综合指标法控制等几种。

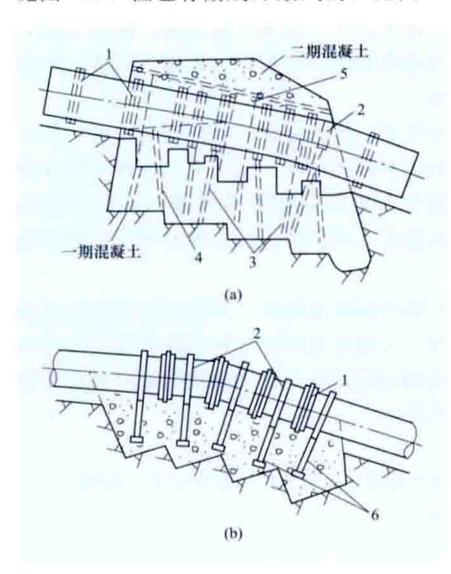
桩体密实度和桩间土加密效果施工质量检测方法有动力触探、标准贯入、静力触探、波速测试，以及现场静载荷试验（包括单桩、桩间土和复合地基载荷试验）等。

zhendun

镇墩　(anchored pier)

固定引水明钢管的支承结构。一般靠自重平衡作用于其上的各种外荷载。一般做成封闭式，

见图（a），但也有做成开敞式的，见图（b）。封闭式镇墩是在钢管外包有一定厚度的混凝土，并用锚件或钢筋将钢管锚固在镇墩上。



镇墩的构造形式

（a）封闭式；（b）开敞式

1—角钢箍环；2—拉环；3—锚筋；4—插筋；5—抗拉钢筋；6—支架

镇墩的设置有5种情况：①明管向下弯曲处；②明管向上弯曲处；③明管水平转弯处；④明管空间转弯处；⑤明管直段上。布设在下转弯处的镇墩，有使镇墩沿地基滑动的趋势。镇墩的断面尺寸应根据结构布置要求确定，并满足稳定及地基承载力要求。明管直线段长度若超过150m，宜在其间加设镇墩和伸缩节。

zhengfa

蒸发

（evaporation）　温度低于水的沸点时，水汽从水体（液态水或固态水）或其他含水物质表面逸入大气的现象。它是水循环中的一个重要环节，是研究水资源开发利用所依据的基本资料之一。一定时段内逸入大气的水量所折算的水层厚度为蒸发量，以mm计。蒸发量主要决定于太阳辐射强度，同时与蒸发面上的风速、气压和蒸发面的性质、位置等因素有关，因此蒸发量随纬度、季节、时刻、水质等情况而变。

一个闭合流域的总蒸发量是陆面蒸发量、植物蒸发量和水体蒸发量之和。根据水量平衡原理，多年平均蒸发量可由相应的降水量减去径流量求得。

水利水电建设中，要研究兴建水库后库区由陆面蒸发变为水面蒸发出现的水库水量变化问题。确定水面蒸发的途径有：①用仪器直接测定，称器测法，用器测法测定蒸发量，方法简便，是确定水面蒸发量的主要途径；②根据水量平衡和热量平衡原理经分析计算间接推求。影响蒸发的因素比较复杂，通过分析计算推求的蒸发量误差较大。

用不同类型的蒸发器与不同的安置方式（陆上或水上漂浮）所测得的蒸发量是不同的。在自然水体的蒸发量难以直接测定的情况下，根据陆上设置的口径面积20m^{2}的大型蒸发池所测得的蒸发量可近似代表自然水体的蒸发量。每日早8时观测大型蒸发池的水面变化，减去当日降水量即为日蒸发量。累积一年的日蒸发量可求得年蒸发量。

zhengchang xushuiwei

正常蓄水位

（normal water level）　水库正常运用的情况下，为满足发电等兴利要求在供水期开始前应蓄到的最高水位。正常蓄水位是决定水电站工程规模和效益的重要参数。

提高正常蓄水位不但可增加水电站的水头，还相应增加了水库的调节库容，从而增加了调节流量，提高了能量效益。位于梯级水电站上游的水电站或负有补偿调节任务的水电站的水库，提高其正常蓄水位，除可增加其本身的能量效益外，还可增加梯级或电力系统中水电站群的能量效益。但正常蓄水位的提高要以增加投资为代价。

影响正常蓄水位选择的主要因素包括：①电力系统对水电站的调节库容及最低出力要求。②防洪、供水、灌溉、航运、生态用水等对水库水位、调节库容、水量的要求。③水库淹没范围及移民安置难度，尤其是具有制约性的重要淹没对象的位置、控制高程等的影响。④重要环境敏感对象的影响。⑤坝址及库区地形、地质条件和筑坝技术的限制。⑥上游梯级水电站尾水位的限制。⑦工程投资，提高正常蓄水位，要相应增加坝高、坝长和坝底宽，坝体工程量的增加值与正常蓄水位的增值常呈大于2次方的指数关系。

正常蓄水位的选择（有的国家也叫库容选择）是水电规划设计中十分重要的技术经济问题，要进行技术经济综合比较。正常蓄水位选择的一般程序为：①在河流规划的基础上，对水库的开发条件（主要包括工程地形、地质条件，水库淹没条件和上、下游衔接关系等）和用水部门的要求进行全面的分析，确定水库正常蓄水位的上、下限范围，拟定比选方案。正常蓄水位的上限，一般需综合分析水库淹没范围、重要淹没对象和重要环境敏感区域等制约条件，移民安置难度、梯级水位衔接以及工程地质与筑坝技术条件等确定。正常蓄水位的下限，在已完成的河流规划中往往已有一个参考范围，可在此基础上进一步确定。②对拟定的各比较方案，根据工程特性，按一致性要求初步选定各方案的水库消落深度、装机容量、机组机型等特征值，进行综合利用水量平衡、能量指标和效益指标的计算及调洪计算，确定防洪特征值。进行建筑物方案布置，初算各方案工程量，进行方案投资计算。③根据各方案的工程效益、工程量、投资、建设工期等成果，进行动能经济比较，从经济角度提出对不同方案的评价结论，然后结合各种影响因素进行技术、经济等综合分析，选择正常蓄水位。

zhidunba

支墩坝

（buttress dam）　由向上游倾斜的挡水面板（或实体）和支墩所组成的坝。坝体所受水、泥沙等荷载作用，通过挡水面板、支墩传至坝基。支墩坝的体积较重力坝小，属轻型坝的范畴，需建在岩质坝基上。支墩坝也可做成溢流坝或在坝体内布设坝身泄水孔。

类型　支墩坝以挡水结构形式分为平板坝、大头坝和连拱坝。平板坝的挡水结构为钢筋混凝土平板，上游坝坡为40°～60°。大头坝由扩大的支墩头部挡水，头部上游面有直线式、折线式、弧线式，上游坝坡坡度为1：0.3～1：0.6（垂直：水平）。连拱坝由拱形面板挡水。

支墩一般呈三角形，有单支墩和双支墩两类。支墩上游边支承挡水结构，底部坐落在基岩上。为增强单支墩的侧向稳定和纵向刚度，支墩间常设置加劲肋、梁或墙。双支墩由

两片墙组成，中间有隔墙连接，在平剖面上呈框格状。双支墩侧向刚度和稳定性高，常适用于较高的坝。

特点 支墩坝的优点有：①支墩间空隙大，有利于坝基排水和降低渗透压力；迎水面向上游倾斜，斜面上的水重对坝体稳定有利。坝体体积一般仅为重力坝的 1/3～2/3。②可调整挡水结构、支墩形式以及相应的跨度和厚度等，使材料强度得到较充分的利用。支墩坝的缺点有：①坝体单薄，渗径短，受温度荷载影响大，易产生裂缝，故对混凝土的强度、抗渗及抗冻等质量要求较高。②施工难度较大，模板多且复杂，对机械化施工不利。

简史 16 世纪西班牙修建了埃尔奇（Elche）砌石连拱坝，坝高 23m。至 20 世纪初期，钢筋混凝土支墩坝才得到较快的发展。1903 年美国首先建成平板坝，而最高的平板坝为 1949 年阿根廷修建的艾思卡巴（Escaba）坝，坝高 38m。1930 年墨西哥修建了马丁（Martin）单支墩大头坝，坝高 105m。世界上最高的大头坝为巴西修建的伊泰普（Itaipu）坝，坝高 196m。最高的连拱坝是加拿大的丹尼尔·约翰逊（Daniel Johnson）连拱坝，坝高 214m。20 世纪初，支墩坝多采用轻薄型的钢筋混凝土结构，至 60 年代有向加大坝体厚度、简化施工的大体积混凝土方向发展的趋势。

20 世纪五六十年代中国先后建成了佛子岭、梅山连拱坝、金江平板坝和磨子潭、新丰江、柘溪、桓仁大头坝等 7 座支墩坝。其中 1956 年建成的梅山连拱坝高 88.2m，是当时世界上最高的连拱坝。1980 年建成的湖南镇水电站，最大坝高 129m，是中国最高的支墩坝。80 年代以后，随着机械化施工的发展，支墩坝已较少采用。

Zhongguo shuineng ziyuan

中国水能资源 (hydropower resources of China)

根据《中华人民共和国水力资源复查成果（2003 年）》，中国水能资源（未计入港澳台）理论蕴藏量在 10MW 以上的河流共 3886 条，水能资源理论蕴藏量为 60 829 亿 kW·h/a，技术可开发装机容量 541 640MW，多年平均年发电量 24 740 亿 kW·h，经济可开发装机容量 401 795MW，多年平均年发电量 17 534 亿 kW·h。表 1 和表 2 分别给出了中国水能资源按地区、按水系分布情况。

表 1 中国水能资源按地区分布表

地区	理论蕴藏量		技术可开发量		
	年发电量（亿 kW·h）	比重（%）	装机容量（MW）	年发电量（亿 kW·h）	比重（%）
华北地区	1202.0	2.0	8396.2	231.1	0.9
东北地区	1143.4	1.9	15 044.7	416.6	1.7
华东地区	2432.3	4.0	22 982.5	718.8	2.9
中南地区	5232.7	8.6	75 517.8	2997. 5	12.1
西南地区	42 951.1	70.6	361 279.8	18 023.9	72.9
西北地区	7867. 5	12.9	58 412.9	2351.5	9.5
全国合计	60 829.0	100.0	541 640.0	24 740.0	100.0

注：表中数值统计范围为理论蕴藏量 10MW 及以上河流和这些河流上单站装机容量 0.5MW 及以上的水电站，不含港澳台地区。

表 2 中国水能资源按水系分布表

水系	理论蕴藏量		技术可开发量		
	年发电量（亿 kW·h）	比重（%）	装机容量（MW）	年发电量（亿 kW·h）	比重（%）
长江水系	24 336.0	40.0	256 272.9	11 879.0	48.0
黄河水系	3794.1	6.2	37 342.5	1361.0	5.5
珠江水系	2823.9	4.6	31 288.0	1353.8	5.5
海河水系	247.9	0.4	2029.5	47.6	0.2
淮河水系	98.0	0.2	656.0	18.6	0.1
东北诸河	1454.8	2.4	16 820.8	465.2	1.9
东南沿海诸河	1776.1	2.9	19 074.9	593.4	2.4
西南国际诸河	8630.1	14.2	75 014.8	3731.8	15.1
雅鲁藏布江及西藏其他河流	14 034.8	23.1	84 663.6	4483.1	18.1
北方内陆及新疆诸河	3633.6	6.0	18 471.6	805.9	3.3
全国合计	60 829.0	100	541 640.0	24 740.0	100

注：表中数值统计范围为理论蕴藏量 10MW 及以上河流和这些河流上单站装机容量 0.5MW 及以上的水电站，不含港澳台地区。

中国水能资源分布特点：

（1）地区分布不均。中国各地区的地形与降雨量差异较大，形成水能资源在地域分布上的不平衡。其中西部 12 个省（自治区、直辖市）水能资源约占全国总量的 81.46%，特别是西南地区云南、贵州、四川、重庆、西藏 5 个省（自治区、直辖市）就占 66.7%；中部 8 个省（自治区、直辖市）占 13.66%；东部 11 个省（自治区、直辖市）仅占 4.88%。

（2）时间分布不均。中国具有明显的季风气候特点，大多数河流年内、年际径流分布不均，丰、枯季节流量相差悬殊，需要建设调节性能好的水库，对径流进行调节，提高水电的总体供电质量，以更好地适应电力市场的需要。

（3）集中分布在大江大河干流。水能资源富集于金沙江、雅砻江、大渡河、澜沧江、乌江、长江上游、南盘江红水河、黄河上游、怒江、雅鲁藏布江下游等水电基地。这些河流水能资源集中，有利于实现梯级滚动开发，有利于建成大型的水电基地，有利于充分发挥水能资源的规模效益实施“西电东送”。

（4）大型水电站装机容量比重大。中国技术可开发水电站中，装机容量 300MW 及以上的大型水电站装机容量和多年平均年发电量的比重分别达 71.8% 和 72.4%，其中装机容量 1000MW 及以上的大型水电站装机容量及多年平均年发电量的比重均超过 50%。

zhongyang kongzhishi

中央控制室 (central control room)

对水电站各类设备进行集中监视与控制的场所。中央控制室是电站运行

管理的中枢，为值班人员提供良好的设备条件和工作环境，其面积、设备配置和布置、室内装修、照明、温度和湿度等都应符合人机工程学的要求，使值班人员能安全、舒适、高效地工作。

设备配置　典型的设备配置为：操作员工作站、调度台、工业电视监视终端、火灾报警监视中心等。除上述设备外，还有些水电站设模拟屏或大屏幕。中央控制室还需设置紧急事故停机和紧急落事故闸门的按钮，用电缆或光纤接到被控设备。

位置设置　一般靠近机组及高压配电装置等主要设备，便于通往主机室、主变压器室及开关站等主要生产场所。主厂房位于地下的水电站，通常在地面、地下厂房均设置一控制室，两个控制室内可实现对全厂设备的监视和操作：投产初期地下控制室作为主用，机组全部投产2～3年后，地面控制室作为主用。许多水电站在稳定运行之后，从百余公里甚至数百公里以外的水电站集中控制中心或梯级调度中心实现对水电站的远程监控，现场实现无人值班。

简史　20世纪60年代开始，国内外水电站逐渐采用控制台和模拟屏的配置取代以往的直立屏或控制屏台，1969年投入运行的刘家峡水电站国内首次采用强电小型化一对一的集中控制方式。此后，中央控制室采用控制台、模拟屏集中控制装置成为水电站的基本配置方式。80年代以来，随着水电站计算机监控系统的应用，监控系统操作员站配置的显示屏、鼠标、键盘等设备，为值班人员提供了灵活、方便的监视与控制手段，逐渐成为中央控制室的主要设备。设置传统操作器具的控制台不复存在，模拟屏也不再是值班人员监视生产过程所必须依赖的设备。有的水电站不设模拟屏，有的水电站采用显示内容丰富但成本较高的大屏幕（包括背投式、液晶式和等离子式）取代模拟屏，也有很多水电站仍设置模拟屏，但其信息主要来自计算机监控系统。

zhongliba

重力坝　(gravity dam)

主要依靠自身重量抵抗外力作用以保持稳定的混凝土坝或砌石坝。坝体基本剖面呈三角形，顶点多在正常蓄水位至坝顶之间，坝底宽与坝高之比一般为0.7～0.8。重力坝的坝轴线在平面上通常呈直线形，有时根据地形、地质条件和工程布置要求设计成折线形或略呈曲线形。重力坝沿坝轴线一般设有横缝，间距多为15～20m，两横缝之间的坝体称为坝段。大多数重力坝建于基岩上，当坝高低于40m时，也可建于经处理后的非岩基上（见软基处理）。重力坝的主要优点有：①结构受力条件明确，安全可靠；②能较好地适应多种地形、地质条件；③设计和施工都较简单；④坝身可布置泄洪、导流和引水发电等建筑物；⑤对混凝土的强度要求较低，便于施工机械化。主要缺点有：①坝体体积大，需要耗用大量水泥和掺合料；②与土石坝相比，对地基的强度和密实度要求较高；③建筑材料的强度未能得到充分利用；④大体积混凝土的温度控制措施较为复杂。

类型　主要以坝体结构形式和坝段间横缝的构造划分。其中，按坝体结构形式分为实体重力坝、宽缝重力坝和空腹重力坝，见图1。

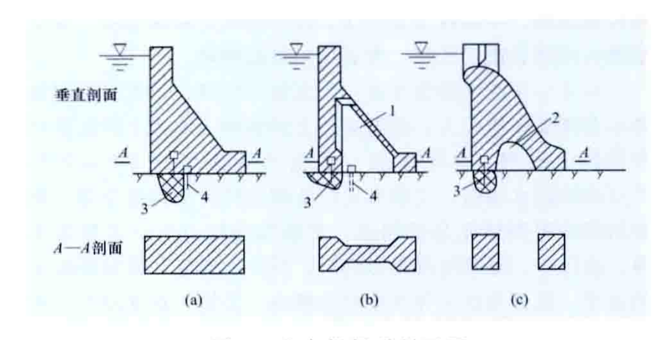


图1　重力坝坝型剖面图

(a) 实体重力坝；(b) 宽缝重力坝；(c) 空腹重力坝

1—宽缝；2—空腔；3—防渗帷幕；4—排水孔

实体重力坝　坝体内无空腔，上游坝坡多为垂直，或下部设1∶0.2左右的折坡，下游坝坡坡度一般为1∶0.7～1∶0.8。实体重力坝按坝段间横缝的构造分为悬臂式、铰接式和整体式3类。

(1) 悬臂式重力坝。横缝为不灌浆的平缝，各个坝段均独立工作，在工程实践中较多采用。

(2) 铰接式重力坝。横缝处设键槽，但不进行灌浆，坝段之间可以传递力，但不传递力矩，如美国的海华西(Hiwassee)重力坝。

(3) 整体式重力坝。横缝间设键槽并进行灌浆，坝段间可以传递力和力矩，如中国的刘家峡水电站重力坝。

宽缝重力坝　将坝段间的横缝扩宽，在坝体内形成顺水流方向的空腔，以利坝基排水和减少坝体混凝土工程量。空腔的宽度通常为坝段宽度的20%～40%。如中国的新安江水电站重力坝。

空腹重力坝　在坝体内沿坝轴线方向设置大尺寸纵向空腔，以节省坝体混凝土工程量、降低坝基渗透压力和改善坝体应力。（见空腹坝）

坝体设计　坝体断面应根据稳定、应力和布置等要求确定，基本断面多由持久状况控制，并以偶然状况复核。采用概率极限状态设计原则，以分项系数极限状态设计表达式进行结构计算。按承载能力极限状态对坝体及坝基进行强度和抗滑稳定计算，按正常使用极限状态对坝体上、下游面应力等进行验算。为了保证重力坝的稳定性，应使坝体或坝基不发生滑动或倾覆破坏（见坝基稳定）。在正常使用情况下，坝踵处和坝体上游面不出现垂直拉应力，坝体和坝基内任一点的应力均不超过其允许应力。

抗滑稳定计算　主要核算坝基面上的滑动条件，当坝体或坝基内存在薄弱面时，还需核算坝体层面或坝基内软弱层面的抗滑稳定条件。采用刚体极限平衡法，沿滑动面进行抗滑稳定极限状态验算：计算公式为$R \geqslant \gamma_d \gamma_0 \psi S$，作用效应函数$S=\sum P$；抗滑稳定抗力函数$R=f'\sum W+c'A$。式中$f'$和$c'$分别为滑动面抗剪断摩擦系数和凝聚力；$\sum P$为滑动面上全部切向作用之和；$\sum W$为滑动面上全部法向作用之和；$A$为滑动面面积；$\gamma_d$为结构系数；$\gamma_0$为结构重要性系数；$\psi$为设计状况系数。

应力分析　对于悬臂梁式重力坝，通常采用材料力学法进行应力分析，高坝还宜采用有限元法进行分析，必要时采用水工结构模型和地质力学模型试验验证。对于整体式重力坝，采用试载法或三维有限元法进行应力分析。

坝体构造　非溢流坝的坝顶宽度和溢流坝的坝顶工作

桥、交通桥宽度应根据设备布置、运行操作、检修、交通、观测及防洪抢险等要求确定。为了防渗和降低渗透压力，在坝基设置防渗帷幕和排水孔，排水孔位于帷幕下游；在坝体内设置排水系统，坝段间横缝设止水和排水。常用的止水片有铜止水片、橡胶止水片和塑料止水片等。为满足帷幕灌浆、排水、交通、安全监测、检查维护，以及坝内通风、闸门操作等方面的要求，在坝体内设置由纵、横向廊道和竖井等组成的廊道系统。通常在靠近上游坝踵处设有基础灌浆廊道，兼作排水、检查等用。

简史 早期的重力坝用石料砌筑，坝体断面肥大，多呈梯形或矩形。据考证，人类修建的第一批重力坝位于尼罗河流域，约于公元前2900年修建的考赛施（Kosheish）坝和公元前2650～公元前2460年修建的卡法拉（Kafra）坝，前者位于古埃及首都孟斐斯（Memphis）城附近，后者位于开罗东南30km处。中国于秦始皇二十八年（公元前219年）在今广西壮族自治区桂林市兴安县建成著名的灵渠，渠上建有高3.9m的干砌石溢流堰，迄今已运行2230多年，为世界上现存最古老的重力坝之一。经过漫长的实践，1853年以后逐步发展了现代重力坝设计理论。进入20世纪后，混凝土重力坝开始迅速发展。美国1916年建成坝高106m的箭石（Arrow Rock）重力坝，1935年建成坝高221.4m的胡佛（Hoover）拱形重力坝。瑞士1962年建成大狄克逊（Grand Dixence）重力坝，坝高285m，是世界上最高的重力坝，见图2。中国广西龙滩水电站碾压混凝土重力坝，坝高192m（远景216.5m），长江三峡水利枢纽工程重力坝，坝高181m，坝顶长2309m，大坝体积为世界第一。



图2 大狄克逊重力坝

参考书目

潘家铮．重力坝设计．北京：水利电力出版社，1987.

周建平，钮新强，贾金生．重力坝设计二十年．北京：中国水利水电出版社，2008.

zhouliushi shuilunji

轴流式水轮机 (axial flow turbine)

轴面水流由轴向进入、轴向流出转轮，将水流能量转换为旋转机械能的反击式水轮机。按其转轮叶片能否转动，分为轴流转桨式和轴流定桨式。轴流式水轮机的使用水头范围一般为3～80m。

结构及特点 轴流式水轮机的结构比较复杂，主要部件包括蜗壳、座环、转轮室、导水机构（含顶盖、底环、导叶等）、导叶调节装置、转轮（含叶片、转轮体、泄水锥等）、主轴（见水轮机主轴）、导轴承（见水轮机导轴承）、轴密封、受油器、尾水管等，见图1，图中同时标示出水流流向。

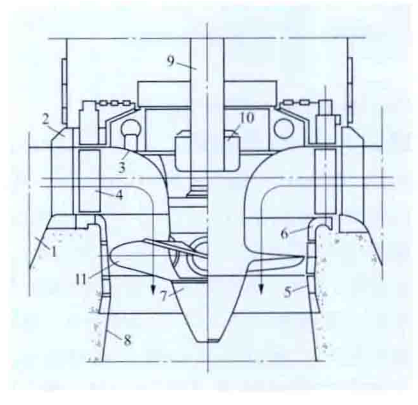


图1 轴流式水轮机结构图

1—蜗壳；2—座环；3—顶盖；4—导水机构；5—转轮室；6—底环；7—转轮；8—尾水管；9—主轴；10—导轴承；11—转轮叶片

轴流式水轮机的蜗壳一般为混凝土浇筑型，水头较高时，亦用钢制蜗壳。混凝土蜗壳是直接在厂房水下部分大体积混凝土中浇筑成的蜗形空腔，断面形状一般为T形或Γ形，钢制蜗壳的断面为圆形。转轮室分为中环和下环两个部分。

轴流式水轮机的转轮包括转轮体（亦称轮毂）、叶片和泄水锥。定桨式水轮机的转轮叶片按一定角度固定于转轮体上，转桨式水轮机则在转轮体内设有一套使叶片转动的操作和传动机构。转轮体有圆柱形和球形两种。转轮叶片的数目一般为4～8个，小型低水头轴流式水轮机也有采用3个叶片的。轴流转桨式水轮机具有双调节性能，即导叶与转轮叶片均可调节，而定桨式则只能调节导叶。所以，轴流转桨式水轮机能在水头和负荷变化较大范围内保持水轮机的运行稳定性和高效率，其应用相对定桨式水轮机而言更为广泛。

发展简史与趋势 1912年，捷克人V.卡普兰（V. Kaplan）提出一种带外轮缘、叶片固定的轴流式水轮机，如图2所示，经过多年的逐步完善，发展成为现代的轴流转桨式水轮机，亦称卡普兰水轮机。

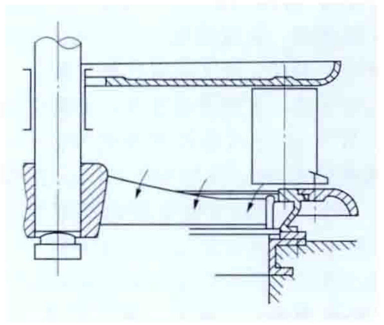


图2 具有外轮缘的轴流式水轮机结构示意

轴流式水轮机的应用不断向高水头、大尺寸方向发展，其使用水头已达80m以上，单机容量及转轮尺寸都趋向增长。世界上使用水头最高的大型轴流转桨式水轮机安装于意大利的那门比亚（Nembia）水电站，最大水头为88m；单机输出功率最大的轴流式水轮机安装于俄罗斯舒尔宾水电站（Шульбинская ГЭС），机组额定功率为230MW；最大的轴流定桨式水轮机安装于尼日利亚的凯因齐电站，机组额定功率135MW（最大输出功率139.7MW），转轮直径8.54m。中国轴流式水轮机的设计制造技术发展很快，已建成的葛洲坝水利枢纽安装的两种轴流转桨式水轮机最大水头为27m，水轮机额定输出功率分别为177.7MW（共2台）和129MW（共19台），转轮

直径分别为 11.3m 和 10.2m，前者为世界上同类水轮机中转轮直径最大的。安装在水口水电站的轴流转桨式水轮机，其最大水头为 57.8m，水轮机额定输出功率为 204MW，转轮直径为 8m。

Zhu Jiang shuixi shuineng ziyuan

珠江水系水能资源 [hydropower resources of Zhujiang (Pearl) River System]　据《中华人民共和国水力资源复查成果（2003）》统计，珠江水系水能资源理论蕴藏量 10MW 及以上的河流共 397 条，理论蕴藏量 2823.93 亿 kW·h/a；其中技术可开发装机容量 31 288.0MW，多年平均年发电量 1353.75 亿 kW·h。珠江水系水能资源分布很不均匀，西江干支流技术可开发装机容量 27 712.3MW，多年平均年发电量 1219.80 亿 kW·h，分别占全水系的 88.6%和 90.1%；北江、东江、珠江三角洲技术可开发装机容量 3575.7MW，多年平均年发电量为 133.95 亿 kW·h，仅占全水系的 11.4%和 9.9%。西江干流南盘江下游、红水河及黔江河段为中国大型水电基地之一，开发条件较好。

珠江流域地跨中国的滇、黔、桂、粤、湘、赣 6 省（区）和越南的东北部（左江的上游段）。流域面积 453 690km²，其中在中国境内 442 100km²，越南境内 11 590km²。珠江水系由西江、北江、东江及珠江三角洲诸河四部分组成，西江、北江在广东省三水市思贤滘、东江在广东省东莞市的石龙分别汇入珠江三角洲河网区，经虎门、蕉门、洪奇门、横门、磨刀门、鸡啼门、虎跳门及崖门等八大口门入注南中国海，平均年径流量 3279.7 亿 m³。

西江水能资源　西江是珠江的主要水系，自西向东流经云南、贵州、广西、广东四省（区），西江干流上游称南盘江，纳北盘江后称红水河，会柳江后称黔江，会郁江后称浔江，会桂江后始称西江，至广东省三水市思贤滘西滘口，全长 2075km，落差 2136m，流域面积 353 120km²（其中中国境内 341 530km²，越南境内 11 590km²），平均年径流量 2220 亿 m³。西江水系支流众多，流域面积大于 10 000km² 的一级支流有北盘江、柳江、郁江、桂江及贺江共 5 条。

西江水系落差大，径流丰沛，水能资源丰富，水能资源理论蕴藏量 2518.48 亿 kW·h/a，占珠江水系的 89.2%。西江干流水能资源理论蕴藏量为 884.23 亿 kW·h/a，占西江干支流总量的 35.1%。西江干支流水能资源技术可开发装机容量 27 712.3MW，多年平均年发电量 1219.80 亿 kW·h，其中干流装机容量 14 706.3MW，多年平均年发电量 652.68 亿 kW·h。西江主要支流有北盘江、柳江、郁江和桂江，水能资源亦很丰富。各支流水能资源见表 1。

表 1　西江各支流水能资源表

支流名称	流域面积 (km²)	水能理论蕴藏量 (亿 kW·h/a)	技术可开发量	
			装机容量 (MW)	年发电量 (亿 kW·h)
北盘江	26 590	311.21	3871	164.75
柳　江	58 270	353.19	2300.8	103.09
郁　江	89 870	296.96	2893.9	117.94
桂　江	18 790	117.76	586.3	25.38

资料来源：《中华人民共和国水力资源复查成果（2003）》。

北江水能资源　北江是珠江水系的第二大水系。北江发源于江西省信丰县，上源称浈水，至广东韶关后称北江，在三水县思贤滘与西江相通，流入珠江三角洲河网区。思贤滘以上流域面积 46 710km²，干流全长 468km，总落差 305m，多年平均年径流量 510.88 亿 m³。

北江干支流水系水能理论蕴藏量 208.42 亿 kW·h/a，技术可开发装机容量 2240.3MW，多年平均年发电量 83.99 亿 kW·h。北江水能资源较分散，干流水能理论蕴藏量 34.53 亿 kW·h/a，仅占北江水系的 16.6%；技术可开发装机容量 463.2MW，多年平均年发电量 17.79 亿 kW·h，仅分别为北江干支流水系的 20.7%和 21.2%。北江干支流由于水库淹没的制约，北江水系技术可能开发的水电站多数为低坝径流式水电站或高水头引水式水电站，水电站规模均属中小型。

东江水能资源　东江发源于江西省浔邬县，由北向南流至广东省东莞市石龙镇进入珠江三角洲，流域面积 27 040km²，干流全长 520km，落差 839m，多年平均年径流量 253 亿 m³。

东江水系水能理论蕴藏量 81.51 亿 kW·h/a，技术可开发装机容量 1153.3MW，多年平均年发电量 43.34 亿 kW·h。东江水能资源不集中，干流水能理论蕴藏量 33.64 亿 kW·h/a，占东江水系的 41.3%。由于淹没的限制，除早已建成的枫树坝和新丰江等水电站规模稍大外，待建水电站多数为低坝径流式水电站，装机规模不大，多数属小型水电站。

zhuchangfang

主厂房 (main power house)　布置水轮机、发电机及其各种附属设备的发电车间。由主机间和安装间组成，是水电站厂房的主要部分，其空间尺寸要满足机组安装、运行、检修的需要，结构应具有足够的强度、刚度及抗渗、抗冻、抗水流泥沙冲蚀能力。主机间高度大，一般分为若干层，通常最上层为发电机层；水轮机蜗壳顶板至发电机层楼板之间的楼层，称为水轮机层，水轮机层以下的布置因装设的水轮机组的类型而异（见水电站厂房）。安装间上部空间的尺寸要与主机间上部空间协调一致，以便起重机行驶。

主厂房的结构一般分为上部结构、下部结构、中部结构。通常把发电机层以上结构称为上部结构，以下称为下部结构。主机间上下游墙内的二期混凝土，如发电机支承结构、钢蜗壳的外围混凝土、发电机风罩等称为中部结构。

地面式厂房的主厂房分为户内式、封闭式和露天式 3 种：①户内式。主厂房具有上部围护结构，最高尾水位以上开设有门窗，可自然采光和通风，室内环境条件好。②封闭式。当水电站下游水位高、变幅大，又不宜将主厂房上部结构抬高到最高设计洪水位以上时，为避免洪水淹没厂房而采用封闭式。这类厂房的对外交通常采用隧洞或竖井连接。③露天式。主厂房无上部结构，发电设备皆布置在发电机层楼盖以下，机组安装和大修吊装时须先揭开发电机保护罩，通常采用露天可移动的门座式起重机操作，受气候变化影响较大。

主机间　又称机组段。安装的水轮机可为冲击式或反击式、立轴或横轴，根据水电站的水头大小及单机容量而定。主机间空间尺寸及各层布置由机组台数、水轮机流道、发电

机尺寸、起重吊装、设备维修、交通及水位变幅诸因素确定。大中型水电站主机间的下部结构块体尺寸大，受温度变化、地基约束及不均匀沉陷等因素的影响，产生的应力较大，通常需要把主机间分成若干区段，每区段内布置1台或2台机组，各个区段之间设有变形缝和止水设施。

安装间　又称安装场、装配间、装配场。面积按机组安装及大修时主要大部件摆放和修理、进厂运输车辆停车场地等需要确定。对于地面式厂房，安装间的地面高程一般要高于下游设计最高洪水位，但也有的水电站低于下游设计最高洪水位，为了防淹，进厂交通采用隧洞下坡或其他挡水设施。安装间建基高程、下部结构尺寸、荷载情况都与主机间差别很大，岩基上厂房通常设有变形缝与主机间分开。小型水电站也有不分缝的，安装间与主机间的下部结构为一个整体。如安装间建基面较低，从基础至安装间楼板之间有较大空间，可以布置副厂房的一部分，安置一些辅助生产设施。

主厂房的上部结构　由屋面板、屋面支承结构、吊车梁、吊车柱、围护墙等组成，内装有供机组安装与检修使用的起重机（简称吊车）。①屋面板采用预制或现浇钢筋混凝土，或其他屋面板材，如彩钢板等。②屋面支承结构有钢制桁架、网架、钢筋混凝土预制桁架或大梁、现浇钢筋混凝土大梁。③吊车梁有钢筋混凝土的（现场浇制、预制、预制现浇叠合等）、钢结构的（实腹板、箱形等），吊车梁支承在吊车柱的牛腿上，有的与吊车柱连成整体，形成厂房纵向排架。④大中型水电站吊车起重量大，又是屋盖的支撑结构，断面尺寸大，故吊车柱多为现浇钢筋混凝土结构。⑤围护墙有砖砌体和钢筋混凝土的，封闭式厂房常要承受水压力，故墙体厚，多与实体屋盖连成实体结构。地面厂房上部结构与下部结构的分缝应相互适应，缝构造需满足伸缩变形和止水要求。

地下式厂房上部结构，除洞室支护结构外，通常四周设有防潮和装饰用的隔墙、吊顶。供吊车行驶的结构，可采用岩锚吊车梁、岩台梁、一般形式的吊车梁柱或利用衬砌拱座挑腿。围岩地质条件好时一般采用岩锚吊车梁。

主厂房的下部结构　复杂的块体结构，通常用钢筋混凝土筑成。主要包括挡水墙、钢筋混凝土蜗壳、尾水管、基础底板，河床式厂房还有进水口结构等。它承受设备传来的静力和动力、内外水压力、上部结构下传的荷载，并将其传递到地基。不同于一般工业厂房，它受水的作用影响很大。

（1）挡水墙是直接承受水压力作用的围护结构，如河床式厂房进水口上的工作闸门及检修闸门的胸墙，地面式厂房下游最高洪水位以下的下游墙和侧墙等。挡水墙墙体厚度根据水压力大小和抗渗要求等确定，处于水位变幅区的挡水墙还要考虑外界温度变化的影响。

（2）较高水头水电站的蜗壳多为金属蜗壳外包钢筋混凝土。水头较低的水电站采用钢筋混凝土蜗壳，最大水头（包括水击压力上升值）可达到70m（如中国陕西石泉水电站）。大多数设计水头超过30m的钢筋混凝土蜗壳为了防渗采用了薄钢板里衬。河床式厂房立轴轴流式水轮机通常采用过水断面为梯形的钢筋混凝土蜗壳，其结构强度及抗渗都应满足要求。

（3）尾水管为连接水轮机转轮出口至尾水渠（洞）的泄水管道，回收转轮排出水流中的部分潜能。尾水管形式尺寸一般由制造厂提供。反击式水轮机尾水管有直锥形和肘形，灯泡贯流式水轮机尾水管呈平卧布置，由圆形断面变至矩形断面。直锥形尾水管常见于小型机组。肘形尾水管由锥管段、肘管段、扩散段组成，有利于减小厂房基础开挖深度。扩散段宽度较大（如8～10m以上）时增设1～2个支墩加强支承作用。通常锥管段镶有钢板里衬，肘管段和扩散段一般不设钢板衬护，但有的水电站弯段也带钢板衬护，少数水电站整个肘形尾水管为钢结构制作，省去混凝土浇筑施工模板和支撑。抽水蓄能电站尾水位较高，弯段及扩散段一般设刚度较大的钢板衬护。

（4）下部结构最底层为基础底板。非岩基上厂房，作用于底板的地基反力大，为满足基础应力及限制裂缝发展要求，常常底板要很厚，并配置相当多的钢筋。岩基上厂房，荷载大部分通过蜗壳、尾水管的边墙和支墩等传递至基岩，作用于底板的地基反力相对较小，还可采取帷幕灌浆和排水措施降低扬压力，所以基础底板可以较薄，而且基础开挖面可按进水口、压力管道、蜗壳、尾水管等底部不同高程设计成阶梯形状，以减少开挖和混凝土浇筑工程量。对于坚硬、完整的基岩，尾水管扩散段底板有的只做抹平衬护。基础底板中常设有排水廊道及集水井等，结构上需局部加强。冲击式水轮机尾水槽（也称泄水槽）的底板和边壁必须耐水流冲刷。

主厂房的中部结构　不直接与水流接触，主要是支承水轮发电机荷载，确保机组能安全运转。一般都是随着机组埋设件的安装分期浇筑。主要有水轮发电机支承结构、钢蜗壳外围混凝土及发电机风罩。

（1）水轮发电机支承结构（简称机墩）。其型式尺寸随机型、单机容量而异，有圆筒式、墙梁式、框架式、矮墩式等。机组重量、静力与动力作用由支承结构传递到下部块体，或通过钢蜗壳外围混凝土结构传递到主机间底板。支承结构要有足够的强度，其强迫振幅不得超过规定的限值。有些低水头大型伞式水轮发电机组的推力轴承安装在水轮机顶盖上，机组转动部分的荷载由水轮机顶盖传至地基的途径为：水轮机顶盖—座环—固定导叶—下环—厂房底板—地基。

（2）钢蜗壳外围混凝土。混流式水轮机进水通常采用钢蜗壳，进口过水断面为圆形，水头不高的钢蜗壳一般承担全水头的水压力，外围混凝土仅作为发电机支承的下部基础，不承担钢蜗壳的内水压力，为此需在钢蜗壳的上半部表面与外围混凝土之间铺设垫层，予以隔离。也有不铺设垫层，而在浇筑外围混凝土时先对钢蜗壳充水加压的，为此需另配备一套密封盖和加压设备。随着大容量、高水头水轮机的发展，有的水电站采用了钢蜗壳与外围混凝土联合受力的方式，以改善机组振动情况和钢蜗壳局部应力。

（3）发电机风罩。一般采用钢筋混凝土结构。可作为发电机通风道的外罩，通常兼作发电机层楼板的中部支承用。

主厂房整体稳定分析　厂房必须满足抗滑、抗浮等稳定要求。稳定分析应考虑运行期、施工期、检修期可能出现的各种不利工况。压缩性大的非岩基还要进行基础沉陷分析，控制沉陷变形在允许范围内。厂房地基要有足够的承载能力和抗渗透稳定性，地质条件差的尚需进行加固处理，加固处理措施一般有水泥固结灌浆、设抗滑齿槽、局部挖填、锚固

桩等。河床式厂房地基通常要设防渗帷幕和排水措施。

zhuchangfang qidiao shebei

主厂房起吊设备 (hoisting equipment of power house)

为安装、检修、吊运水电站主厂房内机电设备而设置的专用提升设备，通常称为起重机。

主要型式　具有上部结构的厂房多采用桥式起重机，露天厂房采用门座式起重机。因水电站露天厂房较少，故使用桥式起重机较多。桥式起重机分为单小车和双小车两种，与门座式起重机的主要部件大同小异。

（1）单小车桥式起重机。由大车（桥架）、小车、提升机构、行走机构、控制室等部件组成，安放在厂房两侧横梁的专用钢轨上，见图1。三峡左岸电站采用的2台 1200/125t 桥式起重机是中国水电站采用的额定起重量最大的单小车桥式起重机。

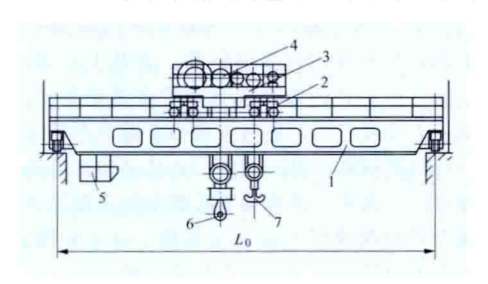


图1　单小车桥式起重机结构示意图
1—大车；2—行走机构；3—小车；4—提升机构；5—控制室；6—主钩；7—副钩；L_0—跨度

每台起重机一般都设置主钩和副钩，主钩的起吊质量为起重机的额定容量，副钩的起吊质量根据产品标准或电站要求配置。

（2）双小车桥式起重机。在加强的桥架或门架上安放两台容量相同的小车，两台小车通过平衡梁联合起吊，总起重量为单个主钩容量的2倍。如每台小车只设主钩，其起升速度可手动换挡到副钩速度。双小车桥式起重机结构见图2。

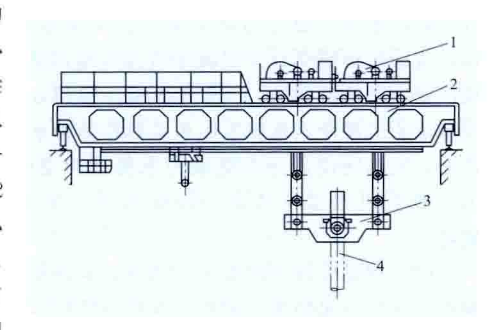


图2　双小车桥式起重机结构示意图
1—小车；2—大车；3—平衡梁；4—主轴

（3）门座式起重机。由门架、行走机构、小车、提升机构和控制室等部件组成，安放在厂房地面两侧的专用钢轨上，见图3。

主要参数　包括起重量、跨度、起升高度、起升速度、行走速度、工作制等。

（1）起重量：起重机允许起吊的最大质量，又称额定容量。

（2）跨度：起重机大车或门架两侧轨道中心线之间的垂直距离，单位为m，如图1中的 L_0，不符合标准尺寸时，可按每隔0.5m确定。

（3）起升高度：吊钩上极限位置与下极限位置之间的高度差，单位为m。

（4）起升速度：起吊部件的上升速度，单位为m/min，一般主钩的起升速度范围为0.5～1.5m/min，副钩的起升速度范围为2～7.5m/min。

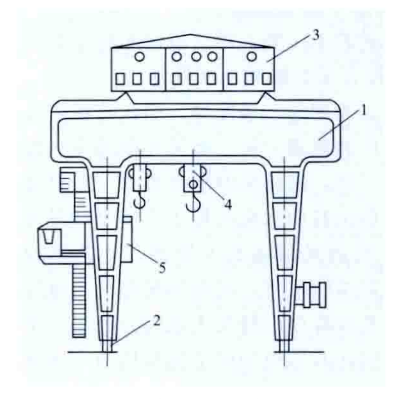


图3　门座式起重机结构示意图
1—门架；2—行走机构；3—小车；4—提升机构；5—控制室

（5）行走速度：起重机大车（门架）和小车的行走速度，以m/min计，大车的行走速度范围为20～35m/min，小车的行走速度范围为10～20m/min。

（6）工作制：按起重机及各机构工作忙闲程度和载荷率划分的等级。水电站厂房起重机一般为轻型工作制。起重机各主要部件中，刹车机构、提升机构等重要部件采用中型甚至重型工作制，其余部件一般采用轻型工作制。

主厂房起重机的配置　桥式起重机在水电站中主要用于水轮机、发电机、进水阀、主变压器等大型设备及一般机电设备的吊运、安装。

（1）起重机按照最重部件的质量并参照起重机系列标准留一定裕量并上靠一挡选用。

（2）机组台数较多的水电站多选用两台桥式起重机，利用平衡梁吊运最重件，起重机的容量仅为最重件质量的1/2。

（3）巨型水电站选用2台双小车桥式起重机时，利用3根平衡梁起吊最重件，见图4。

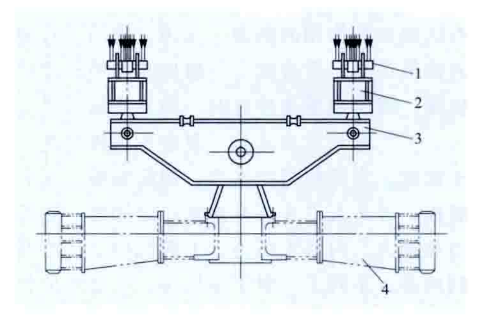


图4　3根平衡梁吊发电机转子示意图
1—小车滑轮组；2—小平衡梁；3—大平衡梁；4—发电机转子

起重机试验　桥式起重机安装或大修后，在吊运最重件设备之前均需进行负荷试验，以保证吊运安全可靠。负荷试验分静负荷试验和动负荷试验。静负荷试验的载荷为起重机额定容量的1.25倍，动负荷试验的载荷为起重机额定容量的1.1倍。

试验方法有：①利用试重块；②利用液压负荷试验器；③利用减小滑轮倍率的方法对提升机构作动负荷试验；④仅对刹车装置进行试验等。

zhuanye xiangmu chuli

专业项目处理 (special item treatment)

对工程建设征地影响的铁路、公路、水运、电力、电信、广播电视、水利水电设施，以及企业、事业单位、文物古迹、矿产

资源、其他项目（军事设施、测量永久标志、气象站）等进行防护、复建、迁移、发掘、保护或货币补偿等工作。

处理方式与原则　移民专业项目处理方式主要有防护、复建、迁建、货币补偿、新建等方式。对工程建设征地影响的移民专业项目，应当按照其原规模、原标准或者恢复原功能的原则和国家有关强制性规定进行恢复或改建。对于不需要或难以恢复的，应根据受征地影响的具体情况，分析确定是否给予合理补偿。对移民安置需新增设的专业项目，应结合原有专业项目和移民安置区专业项目现状水平，按照有利生产、方便生活、经济合理、满足移民安置需要的原则，合理确定其建设标准和规模。

对工程建设征地影响的铁路、公路、水运、电力、电信、广播电视等设施，需要恢复的，应根据影响程度，按原规模、原标准（等级）和恢复原功能的原则，并结合项目所在地的地形、地质条件等，选择经济合理的复建方案。

对工程建设征地影响的抽水电站、水库、闸坝、渠道等水利设施，应根据受影响的程度和具体情况，结合移民安置总体规划，提出经济合理的复建或货币补偿处理方案。

对受工程建设征地影响而必须保护的文物古迹，应根据其文物保护单位的级别和影响程度，提出原址保护、搬迁、发掘、防护或其他保护措施。

对具备防护条件的大片农田、人口密集的农村居民点、集镇、城市、工业企业、铁路、公路、文物等重要影响对象，应选择不低于相应水库淹没处理标准或现状防洪标准，并结合地形、地质条件进行防护方案比较，选择技术经济合理的防护方案。

对符合国家的产业政策需要迁建的企业，应当结合技术改造和结构调整进行，按照原规模、原标准、恢复原有生产能力的原则进行规划设计；对技术落后、浪费资源、产品质量低劣、污染严重、不具备安全生产条件的企业，应依法关闭，研究适当的处理方案。

各专业项目的复建或补偿，按照原规模、原标准或者恢复原功能的原则进行复建或补偿，所需补偿费用列入水电工程补偿投资费用。因扩大规模、提高标准所增加的费用，由有关地方政府或者有关单位自行解决，不列入水利水电工程补偿投资费用。

对移民安置需新增设的专业项目，应结合原有专业项目和移民安置区专业项目现状水平，按照有利生产、方便生活、经济合理、满足移民安置需要的原则，合理确定其建设标准和规模。

规划设计　移民专业项目规划设计的主要任务是依据国家有关政策规定，结合农村移民安置规划、城镇迁建规划，对受水电工程建设征地影响的和移民安置新增的专业项目提出处理方式，确定规模和标准，开展勘测设计，计算投资费用，编制规划设计文件。在水电工程预可行性研究阶段，对建设征地影响的专业项目初拟处理方案，估算处理费用；在水电工程可行性研究阶段，确定处理方案，完成初步设计，编制处理费用概算；在水电工程移民安置实施阶段，复核处理方案，完成施工图设计，编制施工图预算。

水库防护工程：在水库淹没影响区内，如有成片农田、规模较大的农村居民点、集镇、城市、工业企业或铁路、公路、文物等重要淹没对象，应作工程防护和搬迁方案的技术经济论证和方案比较；具备防护条件的，应当在经济合理的前提下，采取修建防护工程等防护措施，减少淹没损失。水库防护工程常用的工程措施有防洪堤（墙）、排洪渠（隧、管）道、滞洪调蓄水库、排涝泵站、自排涵闸、垫高（将地面填高至水库淹没处理高程以上）、排水沟、护岸工程等，应经多方案技术经济比较，合理确定防护区的范围和防护工程的建筑物布置方式。防护工程设计标准应根据受淹没影响对象的类别、规模，遵照 GB 50201《防洪标准》的规定选定，同时兼顾水库淹没处理标准。

交通运输工程：水电工程建设征地影响及移民安置规划涉及的交通运输工程主要包括铁路、公路、厂矿道路、林区公路、乡村道路、水运设施等，规划设计应遵照水电工程移民规范和各行业规范的要求进行规划设计。对复建项目，应按原标准、恢复原功能的原则进行规划。公路、乡村道路、渡口码头等交通设施，应在移民搬迁安置规划、生产开发规划的基础上，结合移民原有交通条件和库周现有交通设施的标准和功能进行统筹规划，形成方便移民的库周交通网络。

水利工程：主要包括水库、水泵站、水电站、水厂、水文站、闸坝、渠道等。规划设计应遵照水电工程移民规范和水利行业规范的要求进行规划设计。供水工程、灌溉工程有集中供水和分散供水等方式；受淹没影响的水电站应根据淹没影响的程度，采取改造处理、补偿剩余寿命期电量损失、复建、货币补偿等方式。

电力工程：电力工程的规划设计应在遵循原规模、原标准、恢复原功能原则的基础上，移民户应考虑移民户户通电。建设征地影响的电力设施可采用复建（改建）、防护、新建、货币（实物）补偿等方式进行处理。对水库淹没影响后需要恢复的电力设施，可采取复建（改建）方式；对影响不大、具备防护条件的电力设施，可采取防护方式，就地加固处理；根据移民安置规划需要新增设的电力设施，可采取新建方式；不需要或难以恢复的电力设施，可进行货币适当补偿。

企业事业单位处理：企业事业单位的淹没处理一般分为迁建、货币补偿、防护等方案。企业事业单位员工的安置和安置费用由原企业事业单位负责。企业事业单位淹没处理方案应符合国家的产业政策规定，遵循技术可行、经济合理的原则，有条件迁建的应优先考虑迁建。

需要迁建的企业事业单位，可以结合技术改造和产业结构调整进行统筹规划和迁建。对于迁建新厂址的选择，需考虑适合的地质、地形条件，有良好水源，不占或少占良田，有利于环境保护，并能利用邻近的社会基础设施，靠近相关企业和原材料产地。对于采用迁建方案的企业事业单位，其迁建补偿费用＝基础设施规划费用＋普通房屋及附属设施补偿费＋专业主厂房重置费用＋构筑物部分重置费用＋不可搬迁设备的重置费用＋可搬迁设备的拆迁损失费、搬迁运输和安装调试费＋联合试运转费＋存货资产的搬迁运输费＋停产损失。

对于不需复建或难以复建的企业事业单位，应根据淹没影响的具体情况，给予合理补偿。对于采用货币补偿的企业事业单位，其货币补偿的费用＝基础设施补偿费用＋普通房屋及附属设施补偿费＋专业主厂房补偿费用＋构筑物部分补

偿费用＋机器设备的补偿费用＋存货资产的补偿费用。企业事业单位淹没处理补偿费用还可以采用补偿评估的方式进行计算。补偿评估的对象是指受淹企业事业单位所有的或依法长期占用的实物形态的受淹资产，包括受淹的设施、设备，具有实物形态的流动资产，迁建企事业单位的停产停工损失，大型专业主厂房等。而对淘汰废置的资产、运输工具以及土地、矿产资源、无形资产等不予评估。

处理实施　移民专业项目处理主要由地方政府及其职能部门负责组织实施，项目业主参与，设计单位进行技术配合。对工程类项目，执行建设项目招投标和工程监理制度；对补偿类项目，由地方移民部门负责补偿兑付，并接受移民综合监理监督。

发展与展望　20世纪90年代以后，中国在水电开发建设中，移民专业项目处理积累了丰富的经验。专业项目处理实现了从根据现状淹没影响实物指标计列补偿费用向根据复建规划设计成果计列补偿费用的转变；从严格执行原规模、原标准、恢复原功能原则向同时执行国家有关强制性标准转变；从重点关注库区向外迁移民安置区延伸；尤其对与移民生产生活息息相关的道路、供水、供电等基础设施，可突破现状，根据移民安置规划的需要进行新增配置，有效地提高了移民的生产生活水平。

zhuanlun

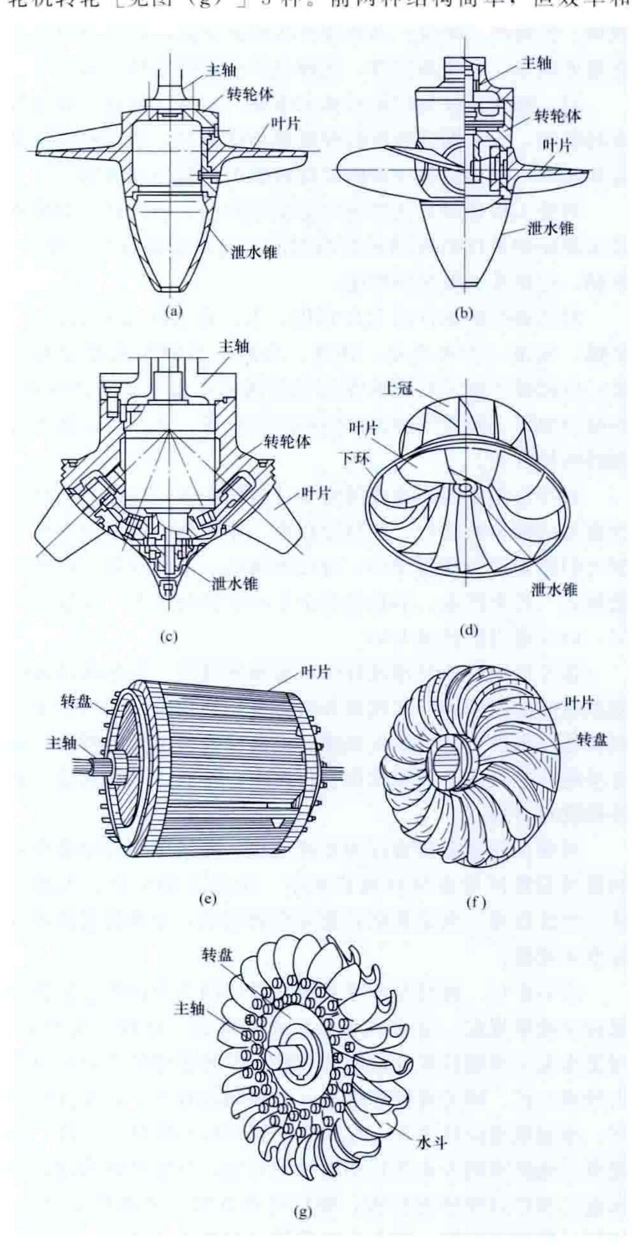
转轮　(runner)　水轮机中将水流能量转换为旋转机械能的部件。按水轮机分类原则，转轮分为反击式水轮机的转轮和冲击式水轮机的转轮两大类，反击式水轮机的转轮又分为轴流式、斜流式、混流式3种。

轴流式水轮机转轮　轴流式水轮机分轴流定桨式和轴流转桨式两种。轴流定桨式水轮机的转轮结构见图(a)，一般有3～6片叶片。中小型转轮叶片和转轮体整体铸造［见图(a)左侧］或叶片铸造后焊在转轮体上。大中型转轮的叶片多数为单独铸造，加工后用螺栓固定在转轮体上［见图(a)右侧］，在转轮体与叶片连接法兰面上设有定位销，安放角固定；有的停机后可以人工调整叶片定位销，以改变叶片的安放角。转轮上部和主轴相连，下部固定泄水锥，其结构简单、制造容易、造价较低，适用于水头、功率变化小的情况。轴流转桨式水轮机的转轮见图(b)，叶片安放角能自动地随工况在一定范围内调节。为了转动叶片，转轮体内装有活塞、油缸、活塞杆、操作架、连杆、拐臂等，上部和带压力油管的主轴相连，下部固定泄水锥，其结构复杂、造价较高，但运行范围广、平均效率高。

斜流式水轮机转轮　见图(c)，叶片安放角能自动地随工况而变，并和导叶开度相匹配，但叶片转动中心线和水轮机轴线成一斜角(45°～60°)，使用水头较高，叶片较多，其结构比轴流转桨式水轮机的转轮更为复杂，已很少应用。

混流式水轮机转轮　见图(d)，由上冠、叶片、下环和泄水锥组成。叶片是固定的，数量多达十几片，叶片上端和上冠相连，下端与下环相连。上冠和下环均设有减少漏水的止漏环，其型式与水头及过机含沙量有关，有间隙式、迷宫式、阶梯式及梳齿式。止漏环一般用热套、焊接或螺栓固定在上冠和下环上，也可在上冠和下环上直接加工。上冠上部和主轴相连，下部固定泄水锥。为保证叶片线型和流道尺寸精确，混流式水轮机转轮制造一般采用上冠、叶片和下环单独铸造加工后再焊接成一体的铸焊结构。为满足运输的限制条件，大型混流式水轮机转轮可采用分半结构或散件运输至现场组焊。分半转轮的上冠用螺栓固定，下环在工地组装后焊接；分半面应根据叶片数选择，以对称和减少叶片切割长度为原则。散件运输至现场组焊的转轮则需在电站工地完成转轮的组装、焊接和加工。小型混流式水轮机转轮制造也可采用整体铸造加工的整铸结构。

冲击式水轮机转轮　从结构上可分为双击式水轮机转轮［见图(e)］、斜击式水轮机转轮［见图(f)］、水斗式水轮机转轮［见图(g)］3种。前两种结构简单，但效率和



各种类型水轮机转轮结构示意图

(a)轴流定桨式水轮机转轮；(b)轴流转桨式水轮机转轮；(c)斜流式水轮机转轮；(d)混流式水轮机转轮；(e)双击式水轮机转轮；(f)斜击式水轮机转轮；(g)水斗式水轮机转轮

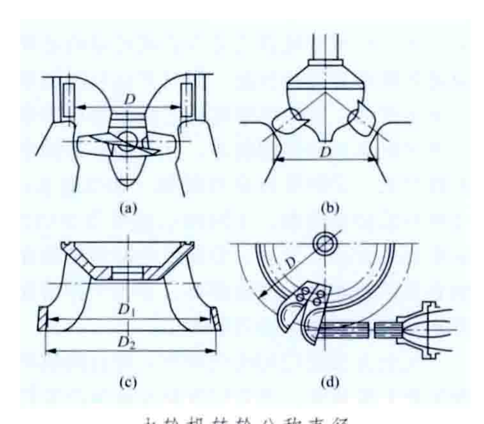
强度较低，只用于小型冲击式水轮机，绝大部分冲击式水轮机的转轮为水斗式。水斗式水轮机转轮一般有 20 个左右的水斗均匀分布在轮盘四周，轮盘直接和主轴相连，其结构简单、维护方便。水斗式水轮机转轮主要有装配组合式、整铸式和铸焊式 3 种结构：①装配组合式，其水斗可以是单个、两个或几个铸成一体，加工后用螺栓固定在轮盘四周，各斗柄之间用锥销或斜楔楔紧，以防运行时松动。这种结构铸造质量容易保证，个别水斗损坏后更换方便，但机械加工量大，固定螺栓容易断裂。②整铸式，水斗和轮盘整体铸造，强度较高，但铸造技术要求高。③铸焊式，水斗和轮盘分别铸造后再焊成一体，铸造质量有保证，但焊接技术要求高。

zhuanlun (yelun) gongcheng zhijing

转轮（叶轮）公称直径 [runner (impeller) diameter]

代表转轮（叶轮）规定部位的直径，以 D 表示，单位为 m。因水力机械的型式结构不同，D 表征的部位也不同。

对水轮机，不同型式的转轮公称直径取法有所不同。轴流式水轮机取转轮叶片轴线与转轮室相交处的转轮室内径，见图（a）；斜流式水轮机取转轮叶片的转动轴线与转轮室交点处的转轮室直径，见图（b）；混流式水轮机取转轮叶片出水边和下环相交处的直径 D_2 或转轮叶片进水边和下环相交处的直径 D_1，见图（c）；冲击式水轮机取转轮水斗与射流中心线相切处的节圆直径，见图（d）。对水泵水轮机，转轮公称直径的取法习惯上与水轮机一致。



水轮机转轮公称直径

（a）轴流式水轮机；（b）斜流式水轮机；（c）混流式水轮机；（d）冲击式水轮机

对原型水轮机，转轮公称直径可由下式计算

$$D=\sqrt{\frac{P_g}{9.81Q_{11}H_r^{1.5}\eta_t\eta_g}} \tag{1}$$

式中 P_g 为发电机功率，kW；Q_{11} 为模型单位流量，m^3/s；H_r 为水轮机额定水头，m；η_t 为原型水轮机效率，%；η_g 为原型发电机效率，%。

世界各国水轮机制造厂对小型水轮机都制定有公称直径的标准系列，在选取转轮直径时，一般根据计算结果并按系列标准用内插法向上靠一档选取，大型机组则不受转轮直径系列的约束。

对蓄能泵，叶轮公称直径的取法与其型式有关。离心式蓄能泵取叶轮前盖板进口直径，轴流、斜流和贯流式蓄能泵的叶轮公称直径取法与水轮机相同。

对原型蓄能泵，叶轮公称直径可由下式计算

$$D=\frac{n_m D_m}{n}\sqrt{\frac{H_p}{H_{p,m}}} \tag{2}$$

式中 n_m、n 分别为模型、原型转速，r/min；D_m 为模型叶轮公称直径，m；$H_{p,m}$、H_p 分别为模型、原型的扬程，m。

对原型水泵水轮机，由于要满足水轮机工况和水泵工况两方面的要求，所以其转轮公称直径的计算一般由水泵工况开始，以水轮机工况复核确定；也可由水轮机工况开始，以水泵工况复核，经几次反复后选定合适的直径。

zhuansu shangshenglü

转速上升率 (speed rising ratio)

水轮发电机组甩负荷时其转速上升过程中转速最大值与额定转速之比的百分数，以 β 表示。转速上升率的数值大小是机组甩负荷过程中水力矩与机组转动部分机械惯性作用的平衡结果，是水电站水力过渡过程计算的重要内容，也是评价机组能否满足电力系统稳定运行要求的重要参数之一，与水轮发电机设计有关。在其他条件不变的情况下，水轮机导叶或针阀的关闭时间越短，转速上升率越小。

转速上升率计算　大中型水电站的水力过渡过程计算均采用计算机仿真程序进行，预测不同甩负荷工况下的机组转速上升率。对于输水系统简单、机组容量不大的小型水电站，也可采用解析法计算，其近似解析计算式为

$$\beta=\left[\frac{\sqrt{1+(2t_c+t_s f)c}}{T_a}-1\right]\times 100\%$$

其中

$$t_c=(0.1\sim0.3)+0.5T_a b_p$$

$$f=1+\sigma$$

$$c=\frac{1}{1+\dfrac{\beta_r}{n_e-1}}$$

$$\beta_r=\frac{2t_c+ft_s}{2T_a(1+0.5\beta_r)}$$

$$\eta_e=\frac{n_{run,11}}{n_{11}}$$

$$T_a=\frac{GD^2n_0^2}{365P_0}$$

式中 t_c 为调节迟滞时间，s；t_s 为导叶直线关闭时间；f 为水击修正系数；c 为考虑水轮机飞逸特性影响的系数；T_a 为机组惯性时间常数，s；b_p 为调速器永态转差系数，一般取 2%～6%；σ 为引水管特性系数；$n_{run,11}$ 为单位飞逸转速，r/min；n_{11} 为甩负荷时初始单位转速，r/min；GD^2 为机组的飞轮力矩，N·m²；n_0 为甩负荷时初始转速，r/min；P_0 为甩负荷前水轮机轴功率，kW。

转速上升率允许值　在计算成果的基础上确定，是电站调节保证值之一。转速上升率允许值是一个技术经济指标。根据工程经验，一般推荐的机组最大转速上升率允许值的取值范围是：当机组容量占系统工作总容量的比重较大，或担负调频任务时，宜小于 50%；当机组容量占系统工作总容量的比重不大，或不担负调频任务时，宜小于 60%；贯流式机组最大转速上升率宜小于 65%；冲击式机组最大转速上升率宜小于 30%。大容量、高转速机组最大转速上升率

的选取除考虑对电网的影响外，还应关注机组自身的安全裕量。在甩负荷过程中，如果调速系统失灵，机组可能进入飞逸状态。对于混流式水轮机，飞逸转速一般为其额定转速的1.7～2.6倍；对于混流式水泵水轮机，飞逸转速一般为其额定转速的1.4～1.6倍。工程中将飞逸转速作为事故条件，要求机组一旦失控时，在飞逸转速下应能连续旋转2～5min不产生有害变形，发电机结构强度也以此作为设计计算基础。

zhuangji rongliang

装机容量 (installed capacity)　水电站全部发电机组的额定出力（铭牌功率）总和。水电站的装机容量是水电站最重要的特征值之一，由必需容量和重复容量组成。必需容量是维持电力系统正常供电所必需的容量，电力系统用电负荷在某一水平时，装设了水电站的必需容量，其他电站就可以少装同等数量的容量，因此必需容量又称为替代容量，必需容量由工作容量和备用容量组成。重复容量是指不能用来担负系统的正常工作，仅在洪水期多发季节性电量，减少火电厂的燃料消耗而装在水电站上的容量，它不起替代容量的作用，不能减少电力系统的装机容量。在不同水文年、不同季节，随着水电站运行状态以及电力系统对水电站的要求不同，这些容量是不同的，而且在一定的条件下，它们之间可以相互转化。水电站日最大工作容量与日平均出力、系统负荷和能否进行日调节有关，丰水期和负荷大时，工作容量大，相应备用容量可小些；枯水期和系统负荷小时，工作容量较小，备用容量可大些。

装机容量中扣除正在检修机组的容量和其他机组的受阻容量［当水电站工作水头小于机组额定水头时，装机容量中有一部分不能承担必需容量，称为受阻容量（见水电站额定水头）］后可被用来运行的容量为可调容量，可调容量中未能被电力系统利用的容量为空闲容量。

水电站装机容量的决定性要素　水电站装机容量的大小取决于水电站能量指标、水电站在系统中的地位和作用及其技术经济特性。

水电站能量指标　表述水电站发电能力及电能质量的指标，通常指保证出力和多年平均年发电量。保证出力和多年平均年发电量是决定水电站装机容量的基础。水电站容量和电量效益应通过电力系统电力电量平衡核定。

水电站在系统中的地位和作用　体现在系统日负荷图上的工作位置及担负系统备用容量的大小上，主要取决于水电站的能量及其在年内的分配、系统负荷特性及电源组成等。当能量一定时，水电站分配在系统负荷大月份（容量平衡控制月份）的能量越多，其装机容量越大；水电站在日负荷图上的工作位置越靠近尖峰，即水电站在一天内的工作小时数越少，担负调峰任务越多，其装机容量越大。水电站在一天内的工作小时数取决于电力系统尖峰的历时。水电站担负系统的备用容量越多，其装机容量越大。所以，水电站的装机容量远大于保证出力，装机容量与保证出力的比值往往达到2～5，甚至更大。

水电站在系统中的地位和作用，受其调节能力的制约。具有季（年）调节能力以上的水电站，才有可能将其能量较多地分配到负荷大的月份，并能担负事故备用。具有日调节以上调节能力的水电站，才能担负系统日负荷的尖峰负荷和负荷备用。具有不完全日调节能力、无调节或下游有航运基荷要求的水电站，只能分别担负系统日负荷的腰荷或基荷，装机容量相应受限制。

水电站技术经济特性　与火电厂相比，水电站机组具有起停快、运行灵活，适宜于调峰和担负系统备用容量的技术特性，且当坝高已定时，增加容量的费用低于火电厂（约为火电厂的1/2），同时增加容量可相应增加发电量，从而有节约火电燃料的经济特性。所以在一定条件下，增加水电站的容量比火电厂经济。因此，水电站的装机容量年利用小时数（即多年平均年发电量与装机容量的比值）或电站年负荷因数（装机容量年利用小时数除以8760h）一般比火电厂小。当水电站调节性能较好，且系统水电比重又不大时，其装机容量年利用小时数可至2000h或更小；当水电站调节性能较差，且电力系统水电比重较大时，其装机容量年利用小时数可较大。

装机容量的选择　常规方法是拟定水电站不同的装机容量和装机程序方案，进行技术经济比较，选择中应包括与装机容量有关的输电线路及输电损失。当规划期内将有若干个电站投产时，可进行水电站群的装机容量选择。常规方法是，先进行水电站群的综合装机容量的选择，然后再进行水电站间装机容量的分配。影响水电站群装机容量分配的技术经济因素为：①输电距离长的电站装机容量宜小些。②长引水道的电站调峰性能较差，且增加容量费用较大，装机容量不宜过大。③有综合利用限制（如航运基荷要求）的电站，装机容量将受限制。④增加容量所增加的发电量大的电站，装机容量宜适当大些。⑤梯级电站的装机容量分配，要照顾到容量的协调及运行的需要。⑥为了补偿调节的需要，某些电站的装机容量宜适当加大。

优化方法是应用优化模型，进行规划期电力系统各类电源装机容量优化，含装机容量及逐年的装机程序及能源资源的经济利用次序。模型可用动态规划或（和）线性规划构造。（见水能利用优化）

由于电力系统规模不断扩大，水电站的能量指标随着梯级调节和跨流域补偿调节的改善，水电站合理装机容量相应加大。世界上有不少水电站都采用分期建设的方案，或在完建若干年后进行扩建，以扩大装机容量。

zimishi hunningtu shigong

自密实混凝土施工 (self-compacting concrete construction)　依靠混凝土自重填充并达到密实效果的施工技术。自密实混凝土具有高流动度、抗离析性、黏性和稳定性，浇筑时依靠其自重流动，无须振捣，适用于现场浇筑的混凝土工程和预制混凝土构件的生产，尤其适用于薄壁、钢筋密集、结构形状复杂、振捣困难的结构工程。

材料特性　自密实混凝土所用材料与水工混凝土基本相同，主要差别是配合比不同，具有高砂率、低水胶比、高掺合料掺量的特点，与水工混凝土相比应适当延长搅拌时间。自密实性能包括流动性、抗离析性和黏性。为了适应和改善浆体的黏性和流动性，自密实混凝土中可掺入增黏剂，并选

用高效减水剂，增加粉体材料用量，取得较好的密实效果。自密实混凝土不宜使用凝结速度较快的水泥。粗骨料最大粒径不宜大于 20mm。自密实混凝土的性能可采用坍落度试验、坍落扩展度试验、V 形漏斗试验和自密实性能稳定性试验检测。

施工方法　自密实混凝土施工应充分考虑结构、原材料、生产、施工和环境等条件的差异，其施工特点是：①浇筑时主要采用泵送，根据施工实际确定混凝土泵的种类、台数、输送管径、配管距离等。②混凝土出厂时应检验其流动性、抗离析性和稳定性。③运输宜使用混凝土搅拌车，对现场浇筑的混凝土应进行监控，当运抵现场的混凝土坍落扩展度低于设计扩展度下限值时不得施工，需采取经试验确认的可靠方法调整坍落扩展度。④由于水泥用量多，混凝土浇筑完毕应及时养护，并适当延长养护时间。

自密实混凝土技术于 20 世纪 80 年代末期首先在日本发展起来，在中国也已应用 10 多年，在水电工程的厂房、隧洞、堆石混凝土筑坝以及公路工程的桥梁等多个领域不断拓展应用。

zonghe liyong gongcheng feiyong fentan

综合利用工程费用分摊

(cost allocation of multi-purpose project)　确定有综合利用效益的水电工程的费用（基建投资和运行费用）由各受益部门承担份额的原则和计算方法。综合利用工程费用分摊的目的在于应用经济杠杆，合理处理综合利用各部门效益和费用的关系，使水资源最有利地为国民经济各部门服务。费用分摊中，一般将工程的建筑物及设施分为共用工程、专用设施和补偿工程设施 3 部分。共用工程含挡水建筑物（大坝、河床式水电站的厂房）和泄洪设施等。专用设施是为某一部门设置的专用设施，含发电引水建筑物、厂房及机电设备、灌溉取水及引水建筑物、过船或过木（竹）建筑物及设施等。补偿工程设施含通航河道上的过船设施、漂木河道上的过木设施及洄游河道上的过鱼设施等。各受益部门分摊的费用，为该部门专用设施的费用、应分摊的共用工程费用与应分摊的补偿工程费用之和。

费用分摊方法　包括按所用水库容积或用水量等指标的比例分摊、按经济效益比例分摊、按在河川上兴建获得同等效益的单独工程费用的比例分摊、按兴建获得同等效益的替代方案费用的比例分摊以及按分离费用-剩余效益法分摊等。

(1) 按所用的水库容积或用水量等指标的比例分摊。此法直观易懂、计算简便，但各种指标相互联系、互相依赖，不易精确划分。如防洪库容和兴利库容可以部分或全部共用，发电、灌溉和航运用水在时间和数量上也难以划分清楚等。

(2) 按经济效益的比例分摊。此法体现了投入产出的概念，易于理解，但问题在于各部门的效益计算基础难以统一，而且有些部门，如防洪、航运部门效益不易算清楚，实际应用有一定困难。

(3) 按在河川上兴建能获得同等效益的单目标工程的费用比例分摊。此法概念清楚，也较为合理，但工作量大，且可能导致某些次要部门分摊费用偏大。

(4) 按兴建获得同等效益的替代方案的费用比例分摊。此法以各部门开发目标为依据，选择合理的替代方案，如发电以另建火电厂替代，航运以河道整治或以陆上交通替代，防洪以加高加固堤防、开辟分蓄洪区等替代，灌溉用分散建提水站替代。替代方案的选择及工作量大是此法的缺点。

(5) 按分离费用-剩余效益法分摊。此法理论较完善，西方国家普遍采用，中国在长江三峡工程论证时也采用过此法。计算步骤为：①计算与各部门所得效益相当的等效替代方案费用的现值，作为该部门的费用。②计算各部门的可分离费用和剩余共用费用。某部门的可分离费用等于工程总费用减去不包括该部门，而使剩余部门仍保持原有效益的工程费用之差值。工程总费用减去各部门可分离费用即为剩余共用费用。③由各部门的替代方案费用减去可分离费用现值，即为该部门的剩余效益。④按各部门剩余效益的比例分摊剩余共用费用。⑤各部门可分离的费用与分摊的剩余共用费用之和即为该部门应分摊的费用。此法的缺点是计算工作量太大，一般应用于大项目。

费用分摊结果应满足的条件　费用分摊涉及面广，尚无公认的适用于多种情况的统一方法。普遍的做法是根据工程的具体情况，以一种方法为主，辅以其他方法，结合电站综合利用的主次关系进行综合分析，确定相对合理的分摊比例。其最后结果应满足的条件包括：①任何受益部门所承担的费用要小于该部门单独承包工程（或相应的等效替代工程）的费用。②各受益部门分担的费用要不大于该部门在工程有效运行期内可获得的效益。③各受益部门分担的费用一般不应小于该部门的可分离费用。

zonghe liyong shuiku jingliu tiaojie

综合利用水库径流调节

(runoff regulation of comprehensive utilization reservoir)　根据综合利用效益最大的原则，协调各水资源用户的矛盾，制订相应水库运行方式的原则与方法。水库除有发电任务以外，还有其他综合利用要求，对径流调节的要求主要反映在对水库各时段调节流量和库水位两方面。

综合利用各用户对径流调节的要求　包括防洪、防凌、灌溉及供水、航运、过鱼、养殖、环境保护等。

(1) 防洪。在汛期，洪水到来之前，控制库水位不高于防洪限制水位，即在该水位以上预留一定的防洪库容，以容蓄洪水。防洪限制水位一般为固定值，有时也可根据洪水在汛期不同时段的规模不同，而有不同数值。

(2) 防凌。北方河流在凌汛期，对控制下泄流量及流量变幅有一定限制。

(3) 灌溉及供水（对城乡生活、生产供水）。主要是对流量及取水高程的要求。灌溉用水集中在灌溉季节。灌溉或供水有从库中引水及库下游引水之分。从库中引走的流量不能发电，从下游引用的流量，其不大于发电流量的部分可同时用来发电。

(4) 航运。要求一定的航深，有时还要求流速及流量的变率不大于某一限值。若为库区航运，要求库水位不低于航

运要求的水位。若为下游航运，则要求在航运期泄放足够的流量，以保持下游航深。对调峰水电站，有时对其日调节的程度作一定的限制。

（5）过鱼。在鱼类产卵季节或有过鱼需要，要求通过鱼道从水库放水，这部分流量不能用来发电。

（6）养殖。在库区鱼类养殖和收获（或捕捞）季节要求库水位不低于或不高于某高程。

（7）环境保护。为避免在水库中出现浅水区，防止钉螺和疟蚊滋生，在某些季节对库水位有一定要求。为保护下游河道的生态环境，对水库放水流量有一定要求。这部分流量中，不大于发电流量的部分，可与发电结合。

水量平衡及径流调节计算　为研究解决各综合利用用户与发电的矛盾，在径流调节计算中，一般根据水资源的情况及各综合利用部门的特点，拟定各种可能的方案，并按各综合利用部门的设计保证率，选择各相应的水文代表年（或代表段），进行水量平衡和径流调节。在计算中，各综合利用用户的要求，表现在流量和水位（或相应的库容）的约束条件上。若约束条件有矛盾，或不能全部满足，则应按各综合利用用户要求设计保证率，从高到低依次满足；对保证率较低的用户，降低其满足的程度（含保证率及对水位及流量的要求）。

zongkurong

总库容

（total storage capacity）　见校核洪水位。

zuankong baopo

钻孔爆破

（drilling and blasting）　用凿岩设备钻孔，装填炸药爆破，破碎岩体的施工技术。钻孔爆破主要包括浅孔爆破、深孔梯段爆破、预裂爆破、光面爆破技术等。在大型水利水电工程施工中，钻孔爆破是各种水工建筑物岩石基础开挖、高边坡开挖、地下工程开挖、岩塞爆破、石料开采、围堰和岩坎拆除爆破的主要施工手段。

钻孔爆破包括钻孔、装药和起爆3道工序，爆破作业需做好安全控制。

钻孔　工程施工中用凿岩设备在岩体上形成爆破孔的施工过程。钻孔的位置、孔径和孔深视所采用的炸药性能、爆破方法等决定。一般孔径越大，装药量也越大，炮孔间距也可加大。在同等条件下，钻孔爆破的效果主要取决于最小抵抗线长度。最小抵抗线越大，爆落方量也越大。一般孔深大于5m的深孔常用潜孔钻钻孔，孔深小于5m的浅孔常用手风钻钻孔。

装药　钻孔内装填炸药的方法根据不同的爆破要求，可分为人工装药或机械装药两种。①人工装药：按设计装药结构在清理检查钻孔后将炸药药卷装进孔内。②机械装药：用专门的气动装药器将药卷或粉状、粒状炸药装入钻孔，有喷射式、压入式或联合式等形式。炮孔装药后，孔口堵塞段用特制炮泥或砂土堵塞。堵塞长度根据爆破要求和炸药特性，由爆破设计确定。

起爆　引爆炮孔内炸药的过程。起爆方式主要有：①火花起爆：用点火器点燃导火索，使导火索的火花引爆火雷管，由火雷管再引爆炸药的起爆方法。这种方法操作简单、节省费用，除有瓦斯或矿尘爆炸危险的地下工程外，一般小量爆破均可使用，导火索的长度应保证操作人员撤离到安全地点，安全性较差。②电力起爆：电流通过导线传输电能激发电雷管，继而起爆炸药的方法。连接成电力起爆网络可以同时起爆很多炮孔。使用延期电雷管可以控制不同炮孔的起爆时间，在起爆前还可用仪表检测整个起爆网络，保证起爆的可靠性，适用于各种爆破工程，但对有杂电流场的场合不宜采用。③导爆索起爆：在导爆索起爆网路中，导爆索既传递爆轰波，又直接起爆炸药。首先用雷管侧向起爆导爆索，而后导爆索再侧向起爆药卷。④导爆管起爆：20世纪70年代开始发展的新型非电起爆方法。首先通过冲击激发源（工业上一般采用雷管）轴向激发导爆管，并在管内形成稳定传播的爆轰波。该稳定爆轰波及高温爆轰产物流导致末端的导爆雷管起爆进而引起药卷的起爆，安全可靠，适用于各种钻孔爆破工程，在水电工程钻孔爆破中广泛采用。

安全控制　钻孔爆破应做好爆破飞石、地震波、空气冲击波、噪声、粉尘和有毒气体等有害效应的防范措施，必要时应对爆破震动进行监测，评价地震波有害效应对邻近建筑物（构筑物）的危害。

zuankong jixie

钻孔机械

（drilling machinery）　在岩土或混凝土中钻凿孔眼的施工设备。水电工程施工中进行地质钻探、地基处理、锚固岩土体或用钻孔爆破进行石方开挖时均需钻孔。此种作业的机械有各种凿岩机、凿岩台车、钻孔机及其辅助设备。凿岩机通常适于钻凿小直径孔眼，钻孔机适于钻凿大直径孔眼。

凿岩机　按照工作动力，可分为风动式、液压式、电动式和内燃式4种；按照破岩造孔方式，可分为冲击式、回转式和冲击回转式3种；按照行走方式，可分为履带式、轮胎式、自行式和拖式等。

风动凿岩机　又称风钻，见图1。它是以压缩空气为动力，使钻头对岩石产生频繁冲击，将岩石破碎而实现钻进。按照架持方式，风动凿岩机可分为手持式、气腿式、导轨式等几种。



图1　风动凿岩机

（1）手持式凿岩机。常用于中硬或坚硬岩石中的钻孔，用人工手持钻凿向下的、水平的或倾斜的孔，钻孔孔径为34～42mm，孔深一般为3～5m。

（2）气腿式凿岩机。主要用于在中硬以上岩石中钻凿水平的和倾斜的孔。其特点是使用可伸缩的气腿来支撑和推进凿岩机工作，减轻工人的劳动强度，提高钻进效率。钻孔孔径为34～42mm，孔深一般为3～5m。

（3）导轨式凿岩机。主要与单柱导轨或钻孔台车配套，用于中硬以上岩石中的钻孔，钻孔孔径为40～100mm，孔深15～40m。

液压凿岩机　由液压冲击器、液压转钎机构和蓄能器3部分组成。与风动凿岩机相比，具有钻进速度快、动力消耗低、噪声小等优点，20世纪70年代以来发展很快，在大型

石方明挖和洞挖工程中与各种凿岩台车相配套，得到越来越广泛的应用。

电动凿岩机　以电动机驱动，使钎杆冲击与回旋，完成钻孔作业。在可靠性、耐久性、安全性及使用维修方面不如风动凿岩机，在水利水电工程中应用不多。

内燃凿岩机　以汽油发动机、压气机、凿岩机组成一体的手持式凿岩工具，适用于无电源和无压缩空气的施工场所。

凿岩台车　可分为掘进台车和露天凿岩台车两类。

掘进台车　又称多臂钻，见图2，主要用于地下岩石洞室掘进时钻凿炮孔和锚杆孔等孔眼。由台车底盘、钻臂、推进器、风动或液压凿岩机和操纵系统等组成。钻孔孔径为50～150mm，孔深20～30m。掘进台车按行走装置可分为轮胎式、轨轮式和履带式3种。每个台车可配置多台钻臂和凿岩机，根据开挖断面的大小选择不同等级的钻臂与臂数，并配以相同等级的凿岩机。



图2　掘进台车

露天凿岩台车　主要用于露天石方开挖和露天矿开采时钻凿炮孔等孔眼。一般由台车底盘、钻臂、推进器、凿岩机和操纵系统等组成。按行走装置可分为轮胎式和履带式两种。台车的钻臂一般均为单臂。凿岩机可以配用风动导轨式凿岩机或液压凿岩机。

钻孔机　有潜孔钻机、冲击钻机、地质钻机、反井钻机等数种。

潜孔钻机　一种回转冲击式钻机，由冲击器、钻具、推压和回转机构、支架等组成，见图3。一般与履带式或轮胎式底盘车相配套。潜孔钻机的冲击器直接潜入孔底钻凿岩石，冲击功的传递损失很小，钻进效率高，噪声也较低，在钻凿深孔时，效果尤为显著。适用于钻凿孔径较大的中、深炮孔，孔径为80～250mm，孔深一般为15～20m。



图3　潜孔钻机

冲击式钻机　适用于土层、砂砾层和局部岩层的垂直钻孔作业。采用曲柄连杆机或卷筒，通过钢丝绳将钻头提升一定高度后自由下落，利用钻头的自重冲击孔底，使岩体破碎而进行钻进。在水利水电工程中常应用于混凝土桩和混凝土防渗墙的造孔。钻孔直径一般为800～1200mm，钻井深度一般为120～180m。

地质钻机　利用钻具一面回转一面下压，以切割、挤压和研磨岩石，使岩石破碎的一种回转式钻机。此种钻机适用于各种硬度的岩石，还可钻斜孔和深孔，并可取出岩心，广泛应用于地质钻探与基础处理工程。按其结构特点的不同，一般可分为油压式钻机、转盘式钻机及手把式钻机等几种形式。钻孔直径一般为56～190mm，钻孔深度可达数百米至千米。

反井钻机　主要用于开挖竖井和斜井。先用小直径钻头钻一导孔，然后换成扩孔钻头扩成导井。反井钻机按钻进方式分为标准式、反向式、混合式和盲井式4种。反井钻机的优点是工人的工作环境得以改善，不存在爆破对围岩的扰动破坏，掘进速度快；缺点是设备投资费用高。反井钻机在煤矿中应用较多，1992年，在中国十三陵抽水蓄能电站中使用，获得了较好的效果，随后在水电工程中的竖井和斜井开挖中广泛应用。中国产煤矿大直径反井钻机的最大掘进深度为600m，最大扩孔直径为5m。德国Ensdorf矿曾用反井钻机成功钻凿深度达1260m、直径为8.5m的竖井。

zuohuan

座环　(stay ring)

反击式水轮机的基础部件，由上环、下环和固定导叶组成。立式机组的座环承受机组的重量、蜗壳上部混凝土的重量、水轮机的水推力及蜗壳的内水压力。座环外圆和蜗壳相接，内圆和顶盖、底环及基础环相连，见图1。



图1　水轮机座环

座环主要分为与混凝土蜗壳连接的座环和与金属蜗壳连接的座环两种：①与混凝土蜗壳连接的座环［见图2（a）］有整体和装配式两种，前者刚度好，便于安装调整；后者的上环与固定导叶采用装配式，没有下环，固定导叶的下端直接埋在混凝土中，便于加工、运输，节约用材，一般只在大型水轮机上采用。②与金属蜗壳连接的座环［见图2（b）］分带蝶形边和无蝶形边两种，前者是常用的传统结构，后者上、下环为箱形结构，刚度好，与蜗壳的连接点靠近固定导叶中心，可改善受力条件，便于组焊，成本低。两者水力性能无明显差别。

固定导叶可取活动导叶数的一半或相同数量，沿圆周均布，也可按等强度原则在高水头金属蜗壳的进口附近和混凝土蜗壳非蜗形部分靠鼻端区域酌加1～2个。固定导叶断面形状根据水力和强度计算确定。为便于顶盖自流排水，常将几个固定导叶设计成空心。座环采用铸钢铸造或铸焊结构，也有全部用钢板焊接的。受运输限制可分成两半或多瓣，用螺栓组合。

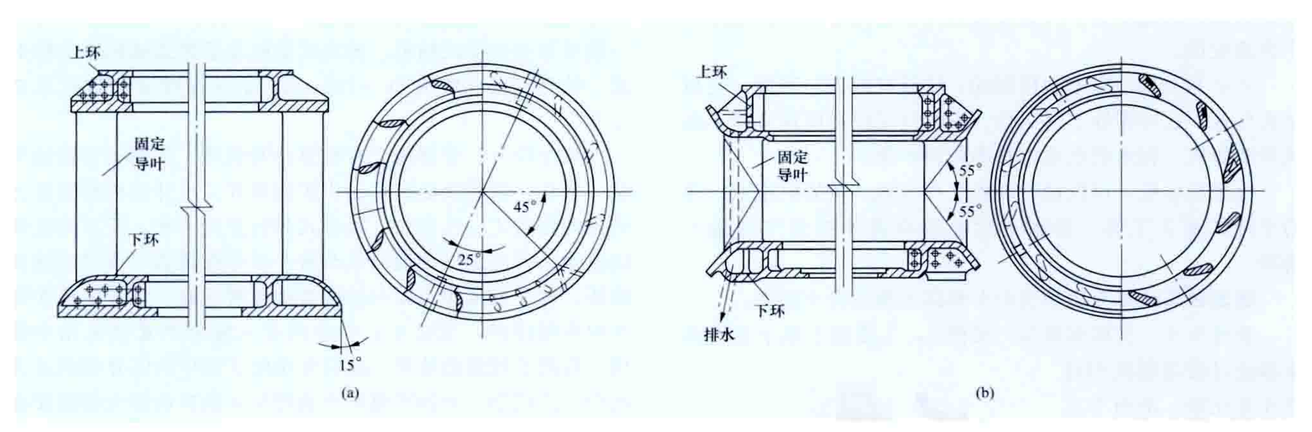


图 2 座环结构示意图

(a) 与混凝土蜗壳连接的整体座环；(b) 与金属蜗壳连接的座环

大 事 年 表

1877年以前
- 公元前11世纪中国已出现水碓。
- 公元前2世纪古代希腊和印度已有水轮磨坊的记载。
- 3世纪世界上第一座拱坝——鲍姆（Borm）砌石拱坝（位于法国）建成，坝高12m。
- 516年中国在淮河中游建成浮山堰，坝高约50m，为当时世界上最高的拦河坝。
- 1825～1826年法国人B. 富尔内龙（B. Fournegron，曾译富聂隆）第一次将水力原动机命名为水轮机，并于1827～1834年制造出了第一台功率为6hp的反击式离心水轮机。
- 1849年美国人J. B. 弗朗西斯发明了混流式水轮机。
- 1855年法国人A. J. C. B. de 圣维南提出圣维南原理。
- 1875年世界上第一座发电厂（火电厂）在法国巴黎北火车站建成。

1878年
- 世界上第一座水电站在法国建成。

1879年
- 美国成立密西西比河流域委员会。

1880年
- 美国人L. A. 佩尔顿发明冲击式水轮机。

1882年
- 美国第一座小水电站——威斯康星州（Wisconsin）福克斯（Fox）河上的瓦肯街（Vulcan Street）水电站建成。
- 世界上第一座抽水蓄能电站——瑞士苏黎世的奈特拉抽水蓄能电站建成。该电站抽水扬程153m，装机容量515kW，是一座年调节抽水蓄能电站。

1883年
- 英国人O. 雷诺发现紊流现象。
- 苏格兰在泰斯河支流上的胡里（Hury）坝建成水池式鱼道。

1884年
- 奥地利颁布世界上第一部小流域综合治理的法律《荒溪治理法》。
- 美国建成世界上第一座混凝土拱坝——熊谷拱坝，坝高20m。

1885年
- 英国人O. 雷诺进行摩塞（Mersey）河模型试验。
- 美国人W. G. 普赖斯的旋桨式流速仪诞生。

1886年
- 奥地利人P. 福希海默尔提出地下水运动的等势线和流网理论。

1887年
- 奥地利人E. 马赫研究超声速流动，提出马赫数。

1888年
- 德国人W. 道伦提出了用张拉钢筋建立预应力的概念。
- 南半球建成第一座小水电站——新西兰里夫顿（Refton）水电站，装机容量20kW。

1889年
- 爱尔兰人R. 曼宁提出计算明渠均匀流流速的曼宁公式。

1891年
- 德国进行艾斯巴克重力坝变形观测。

1895年
- 英国人O. 雷诺提出紊流运动方程组和紊流黏性力的概念。

1897年
- 英国人S. W. 巴约比和C. A. 帕森斯提出了高速水流的“空化”概念。
- 美国内务部地质调查局成立，负责国家水资源、生物资源、能源和矿物资源的管理。
- 瑞士建成世界上第一座地下式厂房——费纳雅茨（Vernayaz）水电站地下厂房。
- 瑞士与德国界河上的莱茵费尔德（Rheinfelden）水电站竣工投产。

1898年
- 德国人H. 恩格斯建立了世界上第一个河工模型试验室。

1900年
- 德国人C. O. 莫尔提出判断材料剪切破坏的莫尔强度理论。

1901年
- 德国人C. 普尔弗里希制成立体坐标量测仪。

1902年
- 法国水力学资料普及协会和法国水力技术学会合办的学术性刊物《水力》（又译名《白煤》）创刊。
- 美国内务部垦务局成立。

1904年
- 德国人L. 普朗特提出流体边界层理论。
- 中国清代《奏定大学堂章程》规定设农科、工科等分科大学，各工科均设主课“水力学”，部分设“水机学”；之后规定“排水及开垦法”列归农科实习课，“水利工学”列为土木工程科主课，是为中国有组织水利教育之始。

1905年
- 中国台湾省龟山水电站建成，装机容量60kW。

1906年
- 俄国人H. E. 儒科夫斯基建立了机翼的升力理论，是飞机、水（汽）轮机、螺旋桨等设计的理论基础。
- 美国新克罗顿（New Crotom）坝最早采用坝面多级阶梯沿程消能。

1908年
- 德国人H. 布拉修斯得到平板层流边界层的精确解。

1909年 • 克罗地亚人A. 莫霍洛维奇提出莫霍面。

1910年 • 德国《水利》创刊。

• 中国大陆第一座水电站——石龙坝水电站开工。电站位于昆明市郊螳螂川，装机容量480kW，1912年4月发电。经1932、1935、1939年扩建，至1949年共有7台机组，总装机容量2.92MW。后又经改建，装有2台3MW机组。

1912年 • 俄罗斯建立土壤改良研究所。1931年改名为水工科学研究所，1940年改名为全苏水工科学研究院，1992年改制为全俄水工科学研究院股份公司。

1914年 • 中国北洋政府在北京设立全国水利局。

1915年 • 日本《土木学会志》创刊。

• 中国北洋政府农商部总长张謇在南京创建河海工程专门学校。

1916年 • 印度在马哈拉施特拉邦浦那成立印度中央水利电力研究站。

• 瑞典人K.E. 彼德森提出计算土坡抗滑稳定安全系数的条分法。

• 德国人A.J. 戈德贝克发明土压力计。

1917年 •《工程新闻记录》(ENR) 在美国创刊。

• 英国人L. 雷利的《液体中球形空穴溃灭时的压强》一文，建立了“空泡动力学”的基础。

1918年 • 意大利人G. 裴同最早进行水跃试验。

1919年 • 美国人E.C. 宾汉由实验得到含沙浑水宾汉塑性体剪切力公式。

• 孙中山在《建国方略》中提出建设长江三峡工程的设想。

20世纪20年代 • 奥地利人V. 卡普兰发明轴流转桨式水轮机。

1920年 • 荷兰人E.J. 约斯滕应用水玻璃和氯化钙进行双液注浆，创造了化学灌浆法。

• 英国人格里菲斯提出判断含裂纹材料脆性破坏的格里菲斯强度准则。

1921年 • 苏联科学院建立世界上第一个水化学研究所。

• 英国人G.I. 泰勒运用拉格朗日法研究紊动扩散。

• 苏联人A.и. 涅克拉索夫证明了二维深水前进波的存在。

1922年 • 日本成立内务省土木试验所。2001年1月更名为日本国土交通省土木研究所。

• 苏联人H.H. 巴甫洛夫斯基提出渗流的电模拟试验方法。

• 国际科学水文协会在法国巴黎成立。1971年更名为国际水文科学协会(IAHS)。

• 瑞典人P. 罗延提出静冰压力计算公式。

• 英国人J. 约勒提出利用放射性同位素测量流量的方法。

1923年 • 中国南京金陵大学任传统等人首先用现代科学理论与方法在山西、山东开展水土流失状况的调查研究。

1924年 • 美国人H.A. 福斯特提出用皮尔逊Ⅲ型曲线选配频率曲线的方法，将概率论和数理统计引入水文学。

• 美国修建狄克斯河坝，为钢筋混凝土斜墙堆石坝，坝高83.9m。

1925年 • 苏联人H.H. 巴甫洛夫斯基提出计算谢才系数的经验公式。

• 美国人K. 太沙基的《理论土力学》出版，是土力学学科形成的标志。1943年《理论土力学》再版。1948年，K. 太沙基与R. 佩克共同出版了《工程实用土力学》，从此土力学成为具有较完整体系的现代学科。

• 美国陆军工程兵团提出田纳西河流域综合开发报告。1933年根据罗斯福总统建议成立田纳西河流域管理局(TVA)，开始实施田纳西河流域综合开发。

1926年 • 德国奥伯纳赫水利研究所成立。

• 苏联首先提出面流消能，并应用于伏尔霍夫水电站溢流坝。

• 法国颁发《水法》。

1927年 • 荷兰代尔夫特水利实验室成立。90年代改成荷兰代尔夫特水利研究所。

• 墨西哥建成世界上第一座大头坝——顿·马丁(Dan Martin)坝。

• 英国人M. 瓦茨发明自动水准仪。

1928年 • 国际大坝委员会(ICOLD)在法国巴黎成立。中国大坝委员会1974年4月成为其成员国。

• 美国人S.P. 铁摩辛柯发表《工程中的振动问题》，总结了结构振动理论及应用。

• 德国进行超声波在水流中顺流和逆流传播时间差的试验。

• 美国提出密西西比河流域开发治理规划。

• 法国人E. 弗雷西内制成预应力钢筋混凝土结构。

• 中国成立扬子江水道整理委员会。

1929年 • 英国人S.D. 泊松发现受拉伸应力的圆棒除产生轴向伸长外还伴随着径向收缩，提出泊松比的概念。

• 美国陆军工程兵团水道试验站(USAEWES)在密苏里州维克斯堡成立。

20世纪30年代中期 • 美国开始使用水文气象法推求可能最大暴雨(PMP)。

1930年 • 俄罗斯《水利工程建设》创刊。

- 美国内务部垦务局用石膏硅藻土进行胡佛坝的结构模型试验。

1931 年

- 苏联人 M. M. 普罗托季亚科诺夫提出岩石坚固系数分类。
- 美国人 P. B. 布基完成世界上第一次离心模型试验。
- 美国科罗拉多河胡佛坝开工。1935 年 9 月完工。拱形重力坝高 221.4m，是世界上第一座 200m 以上的水坝。电站装机 17 台，容量 1.367GW。
- 中国水利工程学会在南京成立，李仪祉为首任会长。
- 混流式水泵水轮机首次安装在意大利的格拉·拜顿水电站，单机容量为 0.6MW。

1932 年

- 苏联人 C. H. 克里茨基、M. Φ. 明凯里等人提出以组合频率为基础的径流多年调节计算方法，将概率论应用于径流调节计算。
- 苏联人 M. B. 波达波夫试验成功表层导流装置。
- 美国人 L. R. K. 谢尔曼提出经验单位线。

1933 年

- 西班牙里科贝约（Ricobayo）枢纽左岸溢洪道首先采用挑流消能。
- 美国人 M. P. O. 布赖恩和苏联人 B. M. 马卡维耶夫分别将紊流扩散理论应用于泥沙研究。
- 美国人 R. R. 普罗克特阐明了土的压实的基本原理。
- 苏联人 M. B. 波达波夫编著的《径流调节》出版，是第一部径流调节计算专著。
- 美国哥伦比亚河大古力水电站开工。1941 年开始发电，1951 年竣工，以后经过扩建改造，装机容量达到 6.809GW，年发电量 248 亿 kW·h。
- 法国人 M. 吕荣提出吕荣试验方法。

1934 年

- 德国建成尼德芬诺升船机，跨度 84m，提升高度 36m，承船厢带水重 4300t，是跨度最大的钢渡槽。

1935 年

- 中国第一水工试验所在天津建成（1933 年成立），其为中国水利水电科学研究院的前身。
- 中央水工试验所在南京筹建，其为南京水利科学研究院的前身。
- 巴拿马地峡区恰格莱斯河上的麦登（Madden）坝底孔泄水管发生严重空蚀破坏。
- 美国人 G. T. 麦卡锡等提出洪水演进的马斯京根法。
- 美国人 C. G. 里克特在研究南加利福尼亚地方性地震时提出地方震级（ML）。
- 苏联首先在奇尔奇克河上采用定向爆破筑坝技术。
- 国际水工建筑物研究协会在比利时布鲁塞尔成立。第二次世界大战后改名为国际水力学研究协会（IAHR）。

1936 年

- 美国胡佛坝在汛期首次发生有感水库诱发地震。
- 国际土力学与基础工程协会（ISSMFE）在美国成立。
- 法国人 H. 洛西叶发明膨胀水泥，是自应力水泥的前身。
- 瑞士设计的世界第一台灯泡贯流式水轮发电机组，安装于波兰路斯汀（Rostin）水电站，装机容量 195kW，转轮直径 1.95m，水头 3.7m。

1937 年

- 中国成立珠江水利局。
- 美国人 H. 劳斯首次提出悬移质含沙量沿水深分布式的规律。
- 中国吉林丰满水电站开工。1943 年第一台机组发电，1948 年修复、改建，1953 年完工，后又经历了二期扩建和三期扩建。

20 世纪 40 年代

- 电气液压调速器（简称电液调速器、电调）出现，其测速、稳定及反馈信号均用电气方法产生，经电气综合、放大后通过电气液压放大部分实现对水轮机接力器的驱动。

1940 年

- 美国人 H. A. 爱因斯坦等提出将河流泥沙划分为床沙质和冲泻质。
- 日本《河川》创刊。
- 中国第一个土工试验室在四川省建立。

1941～1942 年

- 中国人李四光用力学原理研究地壳构造和地壳运动，提出地质力学。1945 年《地质力学的基础与方法》出版，正式创立地质力学。

1942 年

- 美国大古力工程的溢流坝首先采用戽流消能。
- 美国人 C. S. 惠特奈提出极限强度设计理论。
- 中国公布《水利法》。

1943 年

- 丹麦人 K. W. 约翰森提出屈服强度设计理论。
- 美国人 R. 库朗提出有限单元法的基本概念。1956 年美国人 M. J. 特纳和 R. W. 克拉夫提出有限单元法。

1944 年

- 苏联人 M. A. 拉夫连季耶夫首先证明孤立波的存在定理。
- 穆迪发表工业管道沿程损失系数与水流雷诺数的关系曲线。

1945 年

- 中国人黄汲清《中国主要地质构造单位》出版，提出多旋回说。
- 英国制定《英国水法》，提出了一套较完整的水工程规则。

1946 年

- 英国人 R. A. 拜格诺提出波浪起动泥沙的经验公式。
- 苏联人 Б. В. 波莱柯夫提出可用 A. A. 马尔科夫链来描述年径流系列，将随机过程理论和方法引入水文学。
- 美国人 A. M. 弗罗伊登塔提出用概率评价工程结构的安全度。

1947 年

- 美国人 E. N. 哈维等人提出解释空化现象的核子模式。
- 葡萄牙里斯本土木工程研究所（LNES）成立，以小比例尺模型闻名。
- 瑞典人 E. 伯格斯特兰研制成世界上第一台光电测距仪。
- 国际供水协会（IWSA）在英国成立。后发展为国际水务协会，1999 年与国际水质协会合并为国际水协会（IWA）。

1948 年

- 美国人 K. 太沙基提出岩土工程学概念。
- 苏联人 B. A. 奥布鲁切夫提出"新构造"一词。后形成一门研究地壳的近代构造及其构造历史的新学科。

1949 年

- 英国《水力发电》创刊。1975 年更名为《国际水力发电与坝工建设》。
- 阿根廷建成伊斯卡巴（Eskaba）坝，是世界上最高的平板坝，坝高 88m。
- 葡萄牙修建了瓦勒多·盖奥（Valede Gaio）沥青混凝土心墙坝，坝高 45m。
- 中华人民共和国水利部在北京成立。
- 黄河水利委员会成立，负责黄河下游堤防整修。1950 年 1 月，改为流域机构；1951 年 1 月在河南开封正式成立。1953 年底，迁址郑州。后更名为水利部黄河水利委员会。

1950 年

- 俄罗斯古比雪夫水电站开工。1955 年第一台机组发电，1957 年全部 20 台机组发电。库容 580 亿 m³，装机容量 2.3GW，年发电量 105 亿 kW·h，工期较短。
- 中国长江水利委员会成立，在重庆、汉口、南京分设上、中、下游工程局。1956 年 4 月更名为长江流域规划办公室（简称长办），1989 年 6 月再次更名为水利部长江水利委员会。
- 中国治淮委员会在安徽省蚌埠市正式成立。1953 年底，并统一管理沂沭汶泗治理。1958 年，机构撤销。1977 年 5 月，成立水利电力部治淮委员会。1990 年 2 月，更名为水利部淮河水利委员会。
- 中国人林秉南提出明渠非恒定流等时段法。

1951 年

- 意大利贝加莫结构模型试验所（ISMES）成立，以大比例尺模型闻名。
- 瑞士莫瓦桑坝开工。1958 年建成，1989 年开始加高，1991 年完成。坝高 250.5m。
- 中国永定河官厅水库开工。1953 年拦洪，1955 年发电。1979 年大坝加高加固、扩建溢洪道，1989 年完成。
- 瑞典阿利马克公司研制成功爬罐。
- 意大利沃尔图尔诺水电站建成桩柱型混凝土防渗墙。

1952 年

- 法国莱朗河马尔帕塞拱坝开工。1954 年建成双曲薄拱坝，高 66m，1959 年 12 月 2 日蓄水接近坝顶时突然溃决。
- 中国在江苏省南京市成立华东水利学院，其前身为 1915 年创办的河海工程专门学校，1985 年恢复名称为河海大学。

1953 年

- 瑞士罗讷河上的大狄克逊（Grand Dixence）坝开工。1962 年竣工，坝高 285m，是世界上最高的重力坝。
- 美国罗宾斯公司研制成隧洞掘进机。

1954 年

- 印度巴克拉水利枢纽截流。1960 年第一台机组发电，1966 年竣工。
- 中国黄河规划委员会在周恩来总理指导下，编制完成黄河综合利用规划。
- 中国武汉水利学院在湖北省武汉市成立。1959 年改名为武汉水利电力学院，1993 年改名为武汉水利电力大学，2000 年 12 月为武汉大学水利水电学院。
- 中国提出《黄河综合利用规划技术经济报告》。1955 年在第一届全国人民代表大会第二次会议上，国务院副总理邓子恢作报告，通过《关于根治黄河水害和开发黄河水利的综合规划的决议》，确定三门峡、刘家峡为干流第一期工程。1997 年，经过大量工作和反复修改，完成《黄河治理开发规划纲要》。
- 中国在安徽霍山县建成佛子岭水库，坝高 74.4m，是中国第一座混凝土连拱坝。
- 中国《水力发电》创刊。

1955 年

- 俄罗斯安加拉河布拉茨克水电站开工。1961 年第一台机组发电，1964 年建成。库容 1693 亿 m³，装机容量 4.5GW，坝高 125m，是世界上最高的宽缝重力坝。
- 中国与朝鲜合建的水丰水电站恢复改建工程开工。1958 年全部投产发电。库容 149 亿 m³，装机容量 630MW，年发电量 41.3 亿 kW·h。
- 中国正式批准第一部流域规划《黄河综合利用规划技术经济调查报告》。

1956 年

- 意大利瓦依昂坝开工。1961 年建成，是世界上最高的薄拱坝，坝高 262m，坝顶厚 3.4m，坝底厚 22.6m，坝体厚高比 0.086。1963 年坝前左岸发生高速滑坡，滑坡体积 2.5 亿 m^3，造成 250m 高涌浪，漫过坝顶，冲刷下游村镇，水库报废。
- 中国水利部和电力工业部在北京分别建立水利科学研究院和水电科学研究院。1958 年与中国科学院水工研究室合并成立水利水电科学研究院，1994 年更名为中国水利水电科学研究院。
- 中国安徽省建成梅山连拱坝，是当时世界上最高的连拱坝，坝高 88.2m。
- 中国台湾石门水库开工，是台湾第一座具有灌溉、防洪、发电、给水多目标的水资源开发工程。工程于 1964 年竣工。导流隧洞直径 15m。原设计黏土心墙改为砂石骨料掺合水泥搅拌碾压，创世界碾压混凝土坝先例。
- 中国四川狮子滩水电站建成，坝高 51m，是中国第一座堆石坝。

1957 年

- 中国黄河三门峡水利枢纽开工。1960 年大坝基本建成，1962 年安装第一台机组。防洪库容 60 亿 m^3，装机容量 400MW，年发电量 10 亿 kW·h。1964 年至 20 世纪 80 年代先后进行 3 次改建，摸索出了蓄清排浑、调水调沙控制运用方式，基本控制了水库淤积，保证了综合利用效应。
- 中国浙江新安江水电站开工。1960 年第一台机组发电，1978 年全部投产。库容 220 亿 m^3，装机容量 662.5MW，年发电量 18.6 亿 kW·h。采用厂房顶溢流，是中国自行勘测、设计、施工和制造设备的第一座大型水电站。

1958 年

- 中国湖北丹江口水利枢纽开工。1968 年第一台机组发电，1973 年第一期工程完工库容 209.7 亿 m^3，装机容量 900MW，年发电量 38.3 亿 kW·h。
- 中国吉林白山水电站开工。1961 年停建，1975 年复建，1984 年第一期机组发电，1992 年第二期机组发电。库容 62.15 亿 m^3，装机容量 1.5GW，年发电量 20.37 亿 kW·h，是东北地区最大的水电站。
- 中国甘肃刘家峡水电站开工。1961 年停建，1964 年复建，1969 年第一台机组发电，1974 年竣工。库容 57 亿 m^3，设计装机容量 1.225GW，年发电量 57 亿 kW·h。为中国自行设计和建设的第一座装机容量 1GW 以上的水电站。
- 中国湖南柘溪水电站开工。1962 年第一台机组发电，1975 年全部机组投产。库容 35.7 亿 m^3，装机容量 447.5MW，年发电量 22.2 亿 kW·h。
- 中国浙江富春江水电站开工。1962 年停建，1965 年续建，1968 年第一台机组发电，1977 年全部机组发电。库容 9.2 亿 m^3，装机容量 297.2MW，年发电量 9.23 亿 kW·h。
- 中国黄河盐锅峡水电站开工。1961 年第一台机组发电，1975 年全部机组发电。库容 2.2 亿 m^3，装机容量 452MW，年发电量 22.8 亿 kW·h。
- 中国广东新丰江水电站开工。1960 年第一台机组发电，1962 年建成。库容 139 亿 m^3，装机容量 292.5MW，年发电量 11.7 亿 kW·h，水库蓄水后频发有感地震，后经两期抗震加固。
- 中国宁夏青铜峡水电站开工。1967 年第一台机组发电，1978 年全部机组发电。库容 0.56 亿 m^3，装机容量 302MW，年发电量 11.01 亿 kW·h，是闸墩式水电站半露天式厂房。
- 中国浙江湖南镇水电站开工。1961 年停建，1970 年复工，1979 年第一台机组发电，1980 年建成。1994 年扩建，1996 年投产。库容 20.3 亿 m^3，装机容量 270MW，年发电量 5.4 亿 kW·h，首次采用月牙形岔管，闸门设计中首次采用 SF 复合材料等新技术、新结构。
- 中国在安徽霍山县建成磨子潭水库，坝高 82m，是中国第一座大头坝。
- 中国广东流溪河水库建成，坝高 78m，为中国第一座混凝土双曲拱坝。
- 中国北京密云水库开工。1960 年基本建成，库容 43.75 亿 m^3，有中国第一座混凝土防渗墙。

1959 年

- 法国 1954 年建成的马尔帕塞拱坝因岩基失稳导致突然溃坝，死亡和失踪 500 余人，财产损失达 300 亿法郎，是第一座失事的现代双曲薄拱坝。
- 中国《水利水电技术》创刊。
- 中国长江流域规划办公室提出《长江流域综合利用规划要点报告》。
- 中国人钱令希提出新坝型——梯形坝。1979 年建成的湖南镇梯形坝是世界上唯一的梯形坝，坝高 129m。
- 中国与朝鲜合建的云丰水电站主体工程开工。1965 年蓄水发电，1967 年竣工。库客 16.5 亿 m^3，装机容量 400MW，年发电量 17.5 亿 kW·h。

1960 年
- 埃及尼罗河上的阿斯旺水利枢纽开工。1967 年开始发电，1971 年竣工。
- 俄罗斯叶尼塞河上的克拉斯诺雅尔斯克水电站开工。1967 年开始发电，1976 年建成。装机容量 6.0GW，年发电量 204 亿 kW·h。有世界上最大的斜面升船机，最大升程为 115m。
- 中国第一座鱼道在富春江水电站建成。

1961 年
- 塔吉克斯坦努列克水电站开工。1972 年开始发电，1980 年建成。

1962 年
- 加拿大马尼夸根（Maricouagan）河丹尼尔·约翰逊坝开工。1968 年建成。混凝土连拱坝高 214m，是世界上最高的支墩坝。
- 国际工程地质学会成立。
- 国际岩石力学学会（ISRM）在奥地利萨尔茨堡成立。1979 年中国以团体会员加入。
- 中国广东新丰江水电站在距坝 1.1km 处发生 6.1 级强震，震中烈度Ⅷ度，是中国首次报道的水库诱发地震案例。

1963 年
- 委内瑞拉古里水电站开工。1968 年第一台机组发电，1986 年全部机组发电。装机容量 10.2GW，年发电量 510 亿 kW·h。
- 加拿大人 R.F. 汤姆林森提出利用计算机处理和分析大量的土地利用地图数据，建立了世界第一个地理信息系统——加拿大地理信息系统（CGIS）。
- 卢森堡建成菲安登抽水蓄能电站，装机容量 1.096GW。
- 奥地利人 L.V. 拉布采维兹等人创建的新奥地利隧洞施工法（NATM）正式命名。
- 中国人陈明致根据弹性理论提出用差分法计算坝的应力和变形的方法。

1964 年
- 美国人 D.U. 迪尔提出岩石质量指标（RQD）分类。
- 意大利建成阿尔卑·捷拉（Alpe Gera）坝，是碾压混凝土坝的先驱。
- 罗马尼亚和南斯拉夫在多瑙河上合建的铁门水电站开工。1972 年竣工，装机容量 2.05GW，是多瑙河流域最大的水电站。
- 德国蔡司奥本科亨厂试制成功第一台正射投影仪。
- 国际工程地质与环境协会（IAEG）在印度新德里成立。
- 中国台湾大甲溪青山水电站开工。1974 年全部机组发电。库容 59 万 m^3，装机容量 360MW，年发电量 6 亿 kW·h。

1965 年
- 日本人三笠用离心试验研究软土固结问题。
- 格鲁吉亚英古里坝开工。1978 年开始发电，1984 年拱坝竣工，坝高 271.5m，是 20 世纪世界上最高的拱坝。

1966 年
- 中国四川龚嘴水电站开工。1971 年第一台机组发电，1978 年第一期工程建成。库容 3.74 亿 m^3，装机容量 700MW，年发电量 31.18 亿 kW·h。

1967 年
- 美国人 M. 尼吉夫建立了斯坦福泥沙模型。
- 中国台湾曾文水库开工。1973 年竣工。溢洪道堰顶闸门宽 15m、高 20.5m，是 20 世纪末世界上最高大的弧形闸门之一。

1968 年
- 巴基斯坦在印度河上的塔贝拉水利枢纽开工。1976 年正式蓄水发电。坝体填筑量 1.21 亿 m^3，是到 20 世纪末世界上填筑量最大的土石坝。
- 俄罗斯萨扬-舒申斯克水电站开工。1978 年第一台机组发电，1985 年全部机组发电，1987 年竣工。库容 313 亿 m^3，装机容量 6.4GW，年发电量 235 亿 kW·h，为亚洲 20 世纪已建最大的水电站。
- 中国河南省群英砌石重力拱坝开工。1971 年建成。坝高 100.5m，是亚洲同类型坝中最高的。
- 中国河北岗南抽水蓄能电站安装了一台水泵水轮机，额定容量为 15MV·A，出力 10.9～13MW，为中国第一座混合式抽水蓄能电站。

1969 年
- 中国台湾大甲溪上的德基坝开工。1974 年竣工，坝高 181m，是中国最高的薄拱坝。
- 中国甘肃碧口水电站开工。1976 年第一台机组发电，1977 年全部机组投入运行。库容 5.21 亿 m^3，装机容量 300MW，年发电量 14.63 亿 kW·h。坝高 101.8m，是中国第一座高于 100m 的土石坝。

20 世纪 70 年代
- 美国提出“零排放”的目标。
- 中国开始研制基于微机的电液调速器（简称微机调速器）。
- 世界上最早的较完整的水电站计算机监控系统出现在美国。

1970 年
- 美国人 J.M. 拉菲尔发表论文《最优重力坝》，提出面板硬填方坝的设计思想。1992 年，P. 隆德等人提出了面板硬填方坝的概念和设计原则。
- 哥伦比亚契伏坝开工。1975 年第一台机组发电。大坝为黏土斜心墙堆石坝，

高 237m，在斜心墙下游侧设置了双反滤层。

- 中国广东枫树坝空腹宽缝重力坝开工。1978 年基本建成，坝高 95.3m，是中国最高的空腹重力坝。
- 中国贵州乌江渡水电站施工准备开始。工程于 1974 年开工，1979 年第一台机组发电，1983 年竣工。库容 23 亿 m³，装机容量 630MW，年发电量 33.4 亿 kW·h，最大坝高 165m，混凝土拱形重力坝是中国最高的拱形重力坝，采用高压水泥灌浆帷幕与上游砂页岩隔水层相连接的防渗措施，解决了水库渗漏问题，是中国在喀斯特地区修建的第一座高坝。扩机工程 2000 年 10 月开工，装机 2 台，单机容量 250MW，2004 年竣工。扩机后总装机容量 1.13GW，年发电量 40.56 亿 kW·h。
- 中国湖南凤滩水电站开工。1978 年第一台机组发电，1979 年全部机组投产。最大坝高 112.5m，是当时世界上最高的空腹坝。
- 中国长江葛洲坝水利枢纽开工。1981 年大江截流，第一台机组发电，1988 年完工。装机 21 台，容量 2.715GW，年发电量 157 亿 kW·h。

1971 年
- 中国在岷江的映秀湾水电站第一次将沉井技术用于水利工程。

1972 年
- 奥地利马尔塔河柯恩布莱茵坝开工。为高强混凝土双曲薄拱坝，高 200m。1977 年建成。1978 年基础部位开裂，渗漏严重，采取一系列补强措施，1991 年完成。
- 苏联人 B. Д. 罗姆塔捷提出岩石分类。

1973 年
- 在西班牙马德里召开的第十一届国际大坝会议，第一次将“建坝对环境的影响”列为专门议题。
- 加拿大拉格朗德二级水电站开工。1979 年第一台机组发电，1982 年 16 台机组全部发电；扩建工程 1987 年开工，1992 年完工。库容 6.17 亿 m³，装机容量 7.622GW，年发电量 358 亿 kW·h，为世界上已建的第三大水电站，一期厂房长 438.4m、宽 26.5m、高 47.3m，为世界最大的地下厂房。
- 法国建成蒙特西水坡式升船机，为世界上第一座水坡式升船机。
- 中国大坝委员会（CHINCOLD）在北京成立。

1974 年
- 德国建成吕内堡升船机，承船厢带水重 5720t，提升高度 38m，是世界上最大的均衡重式垂直升船机。
- 墨西哥格里哈尔瓦河奇科阿森坝开工。1980 年建成。心墙堆石坝高 261m。
- 英国狄诺维克抽水蓄能电站开工。1984 年竣工。装机容量 1.8GW，是英国最大的抽水蓄能电站。
- 挪威西玛水电站开工。1980 年第一台机组发电，1981 年竣工。库容 6.49 亿 m³，装机容量 1.12GW，年发电量 27.3 亿 kW·h，水头 1038～1149m，为世界上 1000m 级高水头的最大常规水电站。
- 南非人 Z. T. 比尼奥斯基提出岩石地质力学分类（RMR）。
- 挪威人 N. 巴顿提出隧洞岩体工程地质分类（Q 分类）。
- 国际水文计划（IHP）中国国家委员会在北京成立。
- 法国人 L. 梅纳尔提出强夯法。

1975 年
- 塔吉克斯坦的罗贡坝开工，坝高 330m。后因苏联解体，工程停建，未完工。
- 巴西与巴拉圭合建的伊泰普水电站开工。1978 年导流，1982 年蓄水，1984 年第一批 2 台机组发电，1991 年 18 台机组全部发电。库容 290 亿 m³，装机容量 12.6GW，年发电量 750 亿 kW·h，为世界上 20 世纪建成的最大水电站。2001 年扩机 2 台完成，总装机容量达 14GW。
- 巴西图库鲁伊水电站开工。1984 年第一台机组发电，第一期工程 1990 年完建；扩建工程 1998 年开工，第一台机组 2002 年发电。库容 455 亿 m³，装机容量 8.125GW，年发电量 228 亿 kW·h，为巴西第二大水电站。
- 中国滦河潘家口水利枢纽开工。1983 年 9 月向天津市供水，1991 年 6 月第一台蓄能机组并网发电。1993 年底抽水蓄能电站安装的 3 台双速抽水蓄能机组全部投产，单机容量 90MW，工程全部竣工。
- 中国北京密云抽水蓄能电站安装了 2 台水泵水轮机，出力 11～13.5MW，是中国第二座混合式抽水蓄能电站。
- 中国广西大化水电站开工。1983 年第一台机组发电，1986 年竣工。库容 13.93 亿 m³，装机容量 600MW，年发电量 33.19 亿 kW·h。

1976 年
- 中国浑江梯级第三级的太平哨水电站开工。坝型为重力坝，最大坝高 44.2m，总库容 2.09 亿 m³，装机容量 161MW（4×40.25MW），1979 年 12 月第一台机组发电，1981 年 9 月竣工。

1977 年

- 美国人 D. 达尔文和 D. A. 佩克诺德提出双轴应力混凝土本构关系模型。
- 美国巴斯康蒂抽水蓄能电站开工。1985 年竣工。装机容量 2.1GW，是世界第二大抽水蓄能电站。

1978 年

- D. 瓦恩斯提出综合考虑斜坡的物质组成和运动方式的滑坡分类，此分类被国际工程地质协会滑坡委员会建议采用为标准分类。
- 印度特里坝开工。1990 年建成。大坝为斜心墙堆石坝，高 260.5m，坝址在地震区。
- 日本岛地川坝开工。1980 年建成，坝高 89m，为世界上最早建成的碾压混凝土坝。
- 中国黄河龙羊峡水电站开工。1992 年全部机组投入运行。水库库容 247 亿 m^3，是中国 20 世纪已建库容最大的水库。
- 中国湖南省凤滩空腹重力拱坝建成。是 20 世纪 70 年代世界最高的空腹坝，坝高 112.5m。
- 中国湖南省东江水电站开工。1987 年 10 月第一台机组发电，1988 年 6 月全部机组投产，1993 年竣工。施工中，导流隧洞开挖采用光面爆破，坝基开挖采用三面预裂爆破技术。
- 中国提出发展水电事业，建设十大水电基地的设想方案，总装机容量 192.19～197.84GW，年发电量 10 039 亿～10 153 亿 kW・h。
- 中国陕西安康水电站开工。1990 年第一台机组发电，1993 年竣工。库容 25.8 亿 m^3，装机容量 800MW，年发电量 28 亿 kW・h。
- 中国香港地区建成高岛东、高岛西两座沥青混凝土心墙坝，各高 107m 和 102.5m。

1979 年

- 法国大屋抽水蓄能电站开工。1987 年竣工。电站装机容量 1.8GW，是世界上最大的混合式抽水蓄能电站。
- 联合国在尼泊尔加德满都召开第一次国际小水电会议。
- 中国《岩土工程学报》创刊。
- 中国水利部海河水利委员会成立。
- 中国水利部珠江水利委员会成立。

1980 年

- 洪都拉斯胡马亚河埃尔卡洪坝开工。1985 年建成。大坝为混凝土双曲拱坝，高 234m，坝址距地震震中仅 22km 和 14km。
- 巴西福滋度阿里亚钢筋混凝土面板堆石坝建成，坝高 160m。
- 中国水力发电工程学会（CSHE）成立。
- 中国开始每年发布上一年的《全国主要河流水文公报》。
- 中国开展水资源评价工作。其成果为 1987 年出版的《中国水资源评价》、1989 年出版的《中国水资源利用》。
- 中国公布《中国地震烈度表（1980）》。

1981 年

- 联合国工业发展组织（UNIDO）亚太地区小水电研究培训中心在中国杭州成立。
- 中国葛洲坝水利枢纽大江 1 号和三江 2 号船闸建成。闸室有效尺寸为 280m×34m×5m，设计水头 27.5m，是中国最大的船闸。
- 哥伦比亚瓜维奥坝开工。1989 年大坝建成，1992 年第一台机组发电。斜心墙土石坝高 247m，帷幕灌浆最深 120m。
- 中国台湾明湖抽水蓄能电站开工。1985 竣工，装机容量 1GW。
- 中国浙江紧水滩水电站开工。1987 年第 1 台机组发电，1988 年全部机组发电。库容 13.93 亿 m^3，装机容量 300MW，年发电量 4.9 亿 kW・h。设有高低轮式斜面升船机，船道长 845m；转盘式过木竹缆车道，长 644m。

1982 年

- 日本人菊地宏吉、斋藤和雄、楠建一部提出坝基岩体分级标准。
- 中国水利部松辽水利委员会成立。
- 中国云南鲁布革水电站开工。1988 年第一台机组发电，1992 年通过竣工验收。装机容量 600MW，年发电量 28.49 亿 kW・h。

1983 年

- 《中国水力发电年鉴》创刊。
- 中国福建沙溪口水电站开工。1987 年第一台机组发电，1990 年全部机组发电。库容 1.64 亿 m^3，装机容量 300MW，年发电量 9.6 亿 kW・h。

1984 年

- 中国广西岩滩水电站开工。1992 年第一台机组发电，1995 年全部机组投产。2010 年开始扩建 2 台 300MW 机组，装机容量达 1810MW，2013 年第一台机组发电。
- 中国四川宝珠寺水电站复工兴建。1996 年第一台机组发电，1998 年全部机组投入运行，2000 年竣工。库容 25.5 亿 m^3，装机容量 700MW，年发电量 22 亿 kW・h。大坝设计采用厂坝联合结构，减少了坝体混凝土量。
- 鲁布革水电站建设率先在中国基本建设领域推行工程招投标制度。

1985 年

- 中国岩石力学与工程学会成立。
- 中国湖北省西北口混凝土面板堆石坝筹建。1990 年建成，最大坝高 95m，是

中国第一座用现代技术修建的混凝土面板堆石坝。

1986年
- 中国云南澜沧江漫湾水电站开工。电站装机容量1.655GW，其中一期装机容量1.25GW、二期300MW、田坝电站105MW。一期工程于1986年5月开工，1993年第一台机组发电，1995年全部机组投产。二期工程于2004年3月启动，2007年5月全部300MW机组投产。是云南省第一个装机容量1MW级的水电站。
- 中国湖南五强溪水电站开工。1994年第一台机组发电，1996年全部机组发电。库容29.8亿m^3，装机容量1.2GW，年发电量53.7亿kW·h。
- 中国首次采用碾压混凝土技术。在福建大田县建成坑口重力坝，坝高56.8m。

1987年
- 日本大河内抽水蓄能电站开工。1995年竣工。装机容量1.28GW，采用了世界上最大容量的变频交流励磁方式变转速抽水发电系统。
- 中国湖北隔河岩水电站开工。1993年第一台机组发电，1994年全部机组发电。装机容量1.2GW，年发电量30.4亿kW·h。
- 中国贵州东风水电站开工，装机容量510MW。1994年第一台机组发电。大坝为抛物线双曲薄拱坝，高162m，厚高比0.16，是20世纪末亚洲大型工程中最薄的拱坝。2003年机组改造后，装机容量增至570MW。2004年扩机125MW。
- 中国台湾明潭抽水蓄能电站开工。1995年竣工，装机容量1.6GW。
- 中国福建水口水电站开工。1993年第一台机组发电，1996年全部机组投产。库容23.4亿m^3，装机容量1.4GW，年发电量49.5亿kW·h。
- 世界上高差最大（305m）的230kV GIL投运，用于美国Balsam Meadow抽水蓄能电站。
- 中国进行首轮大坝安全定期检查。

1988年
- 南非建成卡耐尔波特（Knellpoort）坝，是世界上第一座碾压混凝土重力拱坝，坝高50m。
- 中国广州抽水蓄能电站开工。2000年竣工。共安装8台300MW机组，为20世纪世界上容量最大的抽水蓄能电站。
- 中国青海黄河李家峡水电站开工。1991年截流，1997年第一台机组发电，1999年全部机组投产，2001年竣工。库容16.5亿m^3，装机容量2GW（第一期1.6GW），年发电量59亿kW·h。有世界最大的蒸发冷却式水轮发电机（单机容量400MW）和20世纪末居世界第一位的装机容量2GW的双排机组厂房。

1989年
- 巴西在托坎廷斯河上建成图库鲁伊（Tucurui）两级船闸，水头70.5m，是世界上设有中间渠道（长5643m、宽140m）水头最高的多级船闸。
- 中国提出建设十二大水电基地的设想方案，总装机容量217.8GW，年发电量10 275亿kW·h。
- 中国西藏羊卓雍湖抽水蓄能电站开工。1997年竣工。为混合式抽水蓄能电站，装机容量112.5MW（4台三机式抽水蓄能机组，1台常规机组），是中国水头最高（816m）、世界高程（地面3600m）最高的抽水蓄能电站。

1990年
- 墨西哥圣地亚哥河阿瓜米尔帕坝开工。1994年建成发电。混凝土面板堆石坝高187m，是20世纪末已建同类型坝中最高的。
- 第一台电子水准仪在瑞士徕卡公司问世。
- 中国辽宁省观音阁碾压混凝土坝开工。1995年建成。是中国第一个采用RCD法建设的碾压混凝土重力坝，也是世界上体积最大的碾压混凝土坝，碾压混凝土量达96.6万m^3。

1991年
- 日本冲绳海水抽水蓄能电站开工。1999年正式发电。发电出力30MW，是世界上第一座利用海洋作下水库的抽水蓄能电站。
- 日本中津川宫濑坝开工。采用RCD法施工，1994年建成。碾压混凝土坝高155m，是日本20世纪末建成的最高碾压混凝土重力坝。
- 中国四川雅砻江二滩水电站主体工程开工。1998年并网发电，2000年通过竣工验收。库容57.9亿m^3，双曲拱坝高240m，装机容量3.3GW，年发电量170.35亿kW·h，是中国20世纪建成的最大的水电站。
- 中国南盘江天生桥一级水电站开工。1998年第一台机组发电，2000年竣工。库容102.57亿m^3，装机容量1.2GW，年发电量52.3亿kW·h。电站坝高178m，为20世纪末世界最高的混凝土面板堆石坝。

1992年
- 土耳其杰依汉河伯克坝开工。1996年建成。大坝为60°对数螺旋线形混凝土双曲拱坝，高201m。
- 中国第七届全国人大第五次会议审议通

过将兴建长江三峡水利枢纽列入国民经济和社会发展十年规划。

- 中国浙江天荒坪抽水蓄能电站开工。2000年竣工。总装机容量1.8GW，最大水头607.5m，为中国单级水泵水轮机水头最高者。
- 中国北京十三陵抽水蓄能电站开工。1997年竣工。电站装机容量800MW。
- 中国黑龙江莲花水电站开工。1996年第一台机组发电，1998年全部4台机组发电。装机容量550MW，年发电量7.97亿kW·h。

1993年

- 中国长江三峡水利枢纽正式开工。1997年大江截流，2003年第一台机组投产发电，2008年左、右岸电站和电源电站投产发电，2009年建成大坝，左、右岸电站和电源电站，船闸，2012年建成右岸地下电站，2015年升船机将建成使用。电站总库容393亿m^3，装机容量22.5GW，年发电量882亿kW·h。五级双线永久船闸单级闸室长280m，宽34m，最小水深5m。
- 日本葛野川抽水蓄能电站开工。1999年12月第一台机组并网发电，2001年竣工。装有4台400MW单级可逆式水泵水轮机，设计水头714m，位列世界第一。
- 中国贵州普定碾压混凝土拱坝建成，是世界上第一座碾压混凝土拱坝，坝高75m。

1994年

- 美国国防部测绘局重新计算全球GPS跟踪站点坐标，得出WGS84（G730）大地坐标系。
- 国际小水电中心（IN-SHP）在中国杭州成立。
- 中国黄河小浪底水利枢纽主体工程开工。1997年截流，1999年蓄水，1999年底第一台机组发电，2001年工程竣工。库容126.5亿m^3，装机容量1.8GW，年发电量51亿kW·h。
- 中国黄河万家寨水利枢纽主体工程开工。1998年11月第一台机组发电，2000年全部机组投产。库容8.96亿m^3，装机容量1.08GW，年发电量27.5亿kW·h。
- 中国南盘江天生桥二级水电站开工。1992年第一台机组发电，2000年竣工。库容0.88亿m^3，装机容量1.32GW，年发电量82亿kW·h。

1995年

- 中国湖南江垭水利枢纽开工。1999年蓄水，2000年第一台机组发电，同年底工程竣工。库容17.4亿m^3，装机容量300MW，年发电量7.56亿kW·h。大坝为全断面碾压混凝土重力坝，高131m。

1996年

- 中国湖北高坝洲水电站开工。2000年全部机组发电，2002年通过竣工验收。库容4.42亿m^3，装机容量252MW，年发电量8.98亿kW·h。

1997年

- 中国云南大朝山水电站正式开工。2001年第一台机组发电，2003年全部机组发电。库容9.4亿m^3，装机容量1.35GW，年发电量59.31亿kW·h。

1998年

- 瑞典普加斯水电中心高压发电机组投入商业运行，额定电压45kV，首次不经变压直接并入同压电网。
- 中国福建棉花滩水电站开工。2001年建成发电。库容20.35亿m^3，装机容量600MW，年发电量15.2亿kW·h。
- 中国自行设计制造了四川红岩子水电站30MW灯泡式机组。

2000年

- 英国《国际水力发电与坝工建设》季刊出版《2000年水电地图集》，调查统计了全球157个国家和地区的水能资源和1998年水电开发情况。
- 中国建立北斗卫星导航系统。
- 中国抽水蓄能电站总装机容量达5590MW，跃居世界第五位，仅次于日本、美国、意大利和德国。

2001年

- 中国清江水布垭水电站开工。2002年10月大江截流，2006年10月导流洞下闸，2007年4月放空洞下闸。2007年7月首台机组投产发电，2008年8月4台机组全部并网运行。电站装机容量1840MW，年发电量39.84亿kW·h。大坝高233m，为世界上已建最高的混凝土面板堆石坝。
- 中国建成沙牌碾压混凝土拱坝，坝高132m，是世界上最高的碾压混凝土拱坝。
- 中国广西龙滩水电站开工。2003年截流，2007年5月第一台机组发电，2008年12月初期工程完工。库容272.7亿m^3，装机容量5.4GW，年发电量187.1亿kW·h。大坝高216.5m，为世界最高的碾压混凝土坝，在第五届碾压混凝土坝国际研讨会上被评选为"碾压混凝土国际性里程碑工程"。
- 中国山东泰安抽水蓄能电站开工。电站装有4台250MW可逆式水泵水轮发电电动机组。2006年6月第一台机组发电，2007年3月全部机组投产发电。
- 中国大陆常规水电装机容量达到77GW，超过美国，排名世界第一位。

2002 年

- 中国云南小湾水电站开工。2004 年 10 月 25 日截流，2008 年 12 月下闸蓄水，2009 年 9 月 19 日首台机组发电，2010 年 8 月全部机组投产发电。库容 150 亿 m^3，装机容量 4.2GW，年发电量 190 亿 kW·h。大坝高 294.5m，是世界上最高的拱坝。

2003 年

- 中国贵州构皮滩水电站开工。2004 年 11 月截流，2009 年 7 月首台机组发电。主体工程于 2009 年 11 月完工（不含通航建筑物），同年 12 月全部机组投产发电。电站装机容量 3000MW，年发电量 96.82 亿 kW·h，是乌江水电梯级开发规划中最大的水电站。
- 中国云南金安桥水电站开工。2005 年 12 月实现大江截流，2011 年 3 月第一台机组投产发电，2012 年 8 月 4 台机组全部投产发电。电站装机容量 2400MW，年发电量 110.43 亿 kW·h。
- 中国西藏拉萨河直孔水电站开工。2007 年 9 月 23 日正式投产发电，是西藏自治区装机容量最大的水电站。

2004 年

- 中国四川瀑布沟水电站开工。2005 年 11 月截流，2009 年 12 月第一台机组发电，2010 年 12 月全部机组投产发电。装机容量 3600MW，年发电量 147.9 亿 kW·h。
- 中国云南糯扎渡水电站开始筹建。2006 年 1 月导流洞主洞开工建设，2007 年 11 月 4 日截流，2011 年 11 月下闸蓄水，2012 年 9 月首台机组投产发电，预计 2014 年 6 月完工。电站安装 9 台 650MW 机组，年发电量 239 亿 kW·h。
- 以黄河公伯峡水电站 1 号机组（300MW）投产发电为标志，中国水电装机突破 1 亿 kW。

2005 年

- 中国四川锦屏一级水电站开工。2006 年 12 月截流。大坝为混凝土双曲拱坝，最大坝高 305m，为世界最高拱坝，2013 年 12 月全线浇筑到顶。电站装机容量 3600MW，年发电量 166.2 亿 kW·h。
- 第十届全国人民代表大会常务委员会第十四次会议通过《中华人民共和国可再生能源法》，自 2006 年 1 月 1 日起施行。2007 年 9 月 4 日，国家发展改革委公布《可再生能源中长期发展规划》。
- 中国海南省因受强风、台风侵袭，全省停电，南丰水电站发电机组第一次黑起动成功，电力系统恢复供电。
- 中国金沙江溪洛渡水电站开工。2007 年 11 月 8 日实现截流。电站装机容量 13.86GW，年发电量 572.4 亿 kW·h，为中国第二大水电站。

2006 年

- 中国黄河拉西瓦水电站开工。2009 年 4 月首台 700MW 机组（6 号机组）正式并网发电。该机组于 5 月 18 日被中国国家发展改革委、中国电力企业联合会授予“全国电力装机容量突破 8 亿 kW 标志性机组”。电站装机容量 4200MW，为黄河上装机容量最大的电站。
- 中国国务院公布《大中型水利水电工程建设征地补偿和移民安置条例》，自 2006 年 9 月 1 日起施行。
- 中国金沙江向家坝水电站开工。电站安装 8 台 750MW 机组，年发电量 308.80 亿 kW·h，为中国第三大水电站。2008 年 12 月进行右侧主河床截流，2012 年 10 月首台机组发电，是世界上已投运的单机容量最大的水轮发电机组。

2007 年

- 中国雅砻江锦屏二级水电站开工。2008 年 11 月实现大江截流，2012 年 12 月首台机组投产发电。电站安装 8 台 600MW 机组，年发电量 242.3 亿 kW·h，是雅砻江上装机容量最大的水电站。
- 世界首台全空冷式 700MW 水轮发电机组——中国龙滩水电站首台机组 72h 带负荷连续试运行一次成功。全空冷式水轮发电机由中国哈尔滨电机厂有限责任公司设计制造。
- 中国长江三峡水利枢纽首台国产化 700MW 机组——26 号机组正式并网运行，发电机采用全空冷式。该机组由中国哈尔滨电机厂有限责任公司独立制造，拥有自主知识产权。

2008 年

- 在 5 月 12 日中国汶川 8.0 级强烈地震中，有大中小型水利水电工程 2380 余座（水电站约 860 座）受到不同程度的损坏，其中 95% 以上的是小型水电站，大中型水电工程无一溃坝，没有造成次生灾害。
- 中国广西桥巩水电站首台机组通过 72h 试运行投产发电。电站安装 8 台 57MW 灯泡贯流式水轮发电机组，单机容量在同类型机组中居中国第一、亚洲第二。

2009 年

- 中国大坝委员会秘书长中国水利水电科学研究院副院长贾金生博士，在第 23 届国际大坝会议上正式当选为国际大坝委员会主席。这是中国科学家首次在该组织中当选主席。
- 中国大坝协会在北京成立。

- 中国拉西瓦水电站800kV GIL（高差210m）成功投入运行，为中国已建水电工程中最高电压等级。
- 俄罗斯萨扬-舒申斯克水电站于8月17日在维修过程中变压器发生爆炸，水电站墙体损毁，机房进水，并造成大量人员伤亡。

2010年

- 中国国家能源局8月25日授予小湾水电站4号机组“全国水电装机突破2亿kW标志性机组”称号。
- 中国西藏藏木水电站正式开工。11月12日成功截流。电站最大坝高116m，总装机容量510MW，年发电量24.5亿kW·h，为雅鲁藏布江干流上规划建设的第一座水电站。
- 中国雅砻江官地水电站和桐子林水电站正式开工，两座电站装机容量分别为2400MW和600MW。

2011年

- 中国广东深圳抽水蓄能电站开工，装机容量1200MW。

2012年

- 中国长江小南海水电站开工。
- 中国丰满水电站全面治理（重建）工程开工。工程新建6台200MW混流式水轮发电机组，保留原三期2台140MW机组，总装机容量1480MW，年均发电量17.09亿kW·h。项目在原大坝下游120m处新建一座大坝，恢复原电站任务和功能，不改变水库特征水位。
- 中国抽水蓄能电站总装机容量达到21700MW，规模超过日本，列世界首位。

2013年

- 中国福建仙游抽水蓄能电站1号机组并网发电。电站安装4台300MW立轴单级可逆混流式机组，上下池落差470m，为中国投产的最高水头抽水蓄能电站。
- 中国承制的世界单机容量最大的贯流式水轮发电机组——巴西杰瑞（Jirau）左岸电站首台机组完成调试和试运行，移交电厂正式投入商业运行。
- 国际咨询工程师联合会（FIDIC）9月15～18日在西班牙巴塞罗那召开2013年年会暨FIDIC成立百年庆典大会。中国13个项目获得“百年重大工程项目”奖，其中，龙滩水电站和长江三峡水利枢纽分别获得“百年重大土木工程”优秀奖和杰出奖。

条目标题汉字笔画索引

说　明

一、本索引供读者按条目标题的汉字笔画查检条目。

二、条目标题按第一字的笔画由少到多的顺序排列，笔画数相同的字按起笔笔形一（横）、丨（竖）、丿（撇）、丶（点）、乛（折，包括亅乚く等）的顺序排列。第一字相同的，依次按后面各字的笔画数和起笔笔形顺序排列。

三、以罗马数字、阿拉伯数字、拉丁字母、斯拉夫字母和希腊字母开头的条目标题依次排在汉字开头的条目标题的后面。

四、参见条（虚条）的页码采取虚实条兼注的方式，即参见条页码在括号外，被参见条页码在括号内。

二画

[一]

[丿]

三画

[一]

[丨]

[丶]

[乛]

四画

[一]

五画

［一］

六画

［一］

七画

八画

[一]

[丨]

[丿]

[丶]

[乛]

九画

[一]

十画

十一画

十六画

[、]

十七画

[丿]

十八画

[、]

十九画

[、]

二十画

[、]

条目标题外文索引
(INDEX OF ARTICLES)

A

B

C

D

E

I

J

K

L

Q

R

S

T

U

V

W

内 容 索 引

说 明

一、本索引是全卷条目和条目内容（含插图）的主题分析索引。索引主题按汉语拼音字母的顺序并辅以汉字笔画、起笔笔形顺序排列。同音时，按汉字笔画由少到多的顺序排列，笔画数相同的字按起笔笔形一（横）、丨（竖）、丿（撇）、丶（点）、乛（折，包括亅乚く等）的顺序排列。第一字相同的，按第二字，余类推。以罗马数字、阿拉伯数字、拉丁字母、斯拉夫字母和希腊字母开头的主题，依次排在汉字索引主题的后面。

二、设有条目的主题用黑体字，未设条目的主题用仿宋体字。

三、索引主题之后的阿拉伯数字是主题内容所在的页码，数字之后的小写拉丁字母表示索引内容所在的版面区域。本书正文的版面区域划分如右图。

a	d
b	e
c	f

C

D

E

F

G

H

J

K

Y

Z

插 图 索 引

水力发电卷（第三版）修订人员名单

（按姓氏笔画排列）

万凤霞 王仁坤 王仲龙 王志宏 王　波 王柏乐 王　奎 王钦权
王晓鹏 王朝阳 王善春 邓　灿 叶建群 白之淳 白学翠 冯兴常
冯树荣 吕明治 向光红 刘元元 刘凤秋 刘书玉 刘玉山 刘志新
刘林军 刘昌栋 刘　斌 江亚丽 许长红 孙志禹 严秉忠 苏加林
苏　萍 杜秀惠 杜雷功 李小山 李广信 李　英 李明英 李修树
杨成祝 杨启贵 杨　君 杨益才 肖万春 肖　锋 吴关叶 吴述彧
何贤佩 余　波 汪志强 汪青辽 张巨波 张尚鹏 张国富 张宗亮
张　荣 张　信 张　敏 张维力 张锦堂 张燕春 陈平平 陈占恒
陈国庆 陈祥荣 陈　雷 邵　荣 苟胜国 苑　睿 范瑞琪 范福平
罗　林 罗洋涛 金晓华 周兰生 周林辉 周建平 周晓光 於三大
春光魁 赵云发 赵纪民 赵　琨 郝巨涛 郝红升 胡品煜 钟广宇
钟国华 侯永平 姜正良 姜忠见 姜树德 姚栓喜 敖大华 袁定远
贾金生 夏传清 钱钢粮 徐天宝 徐光祥 徐泽平 高季章 郭　军
郭红彦 郭建欣 郭维祥 黄天润 黄华章 黄　俊 曹光荣 戚国庆
康智明 章　青 扈晓雯 董化宏 蒋国澄 蒋效忠 景来红 谢　俊
强继红 靳亚东 雷有栋 裴惠年 廖仁强 谭　建 潘江洋 冀培民
魏小婉

水力发电卷（第一版）撰稿人员名单

（按姓氏笔画排列）

丁志华　丁联臻　万兆惠　马君寿　王正宏　王华阳　王　冰　王守道
王应高　王庭济　王洪运　王家柱　王　琪　韦　港　卞富宗　叶世勋
叶金汉　史毓珍　皮淑范　朱元甡　朱世琦　朱伯芳　朱京城　朱建业
朱经祥　朱效章　朱藻文　伍宏中　庄万康　庄德桢　刘　卫　刘玉林
刘丽栗　刘　杰　刘峻德　刘维德　刘福鉴　汝乃华　许自达　孙　钊
李久昌　李广信　李必如　李桂芬　李浩钧　李维藩　李锦坤　杨金栋
杨承沪　杨荫华　杨赉斐　杨德功　杨德晔　时启燧　吴次光　吴铭江
邱景安　余常昭　谷云青　邹小安　沙锡林　沈义生　沈星源　沈淦生
沈德民　张　仁　张进平　张志宏　张宏英　张英会　张学中　张根林
张晓宇　张德平　张德培　陆茂竹　陆钦侃　陆家佑　陈志恺　陈励元
陈直哉　陈厚群　陈祖安　陈祖煜　陈家琦　陈惠欣　陈魁芳　陈愈炯
青长庚　范天佑　范元勋　茅玉清　林可冀　林益冬　欧阳华　欧阳金
周维垣　周惠珠　郑顺炜　赵辅鑫　赵毓崑　赵增凯　赵鹤勤　胡积龄
柳宇强　侯建功　俞培基　郗绮霞　姜乃森　贺至刚　袁　玖　夏方佐
顾传智　殷有泉　高又生　唐友一　陶振宇　黄仁福　黄贤鉴　黄宣范
黄益芬　曹学敏　曹健人　曹楚生　龚贵焘　崔诗礼　章景安　梁见诚
屠明德　董育坚　蒋友谅　蒋国澄　傅华玲　廖　松　熊思政　潘天缘
潘少川　潘长龄　濮家骝

水力发电卷（第二版）修订人员名单

（按姓氏笔画排列）

丁联臻　干　城　王小润　王正宏　王华阳　王家柱　王梅地　卞富宗
方仁志　方　辉　叶丽秋　叶金汉　叶建群　叶钟黎　白以昕　朱尔蓉
朱伯芳　朱建业　朱经祥　朱效章　庄万康　刘文学　刘文端　刘兰桂
刘　杰　刘国阳　刘明宏　刘树君　刘维德　刘瑛珍　关宗印　汤宜芹
孙　钊　李广信　李世东　李启章　李武伦　李国华　李治平　李定中
李珍照　李桂芬　李浩钧　李维东　李维藩　李锦坤　杨多根　杨志雄
杨金栋　杨承沪　时启燧　吴干城　吴铭江　邱毓萍　余国铨　余常昭
沈义生　沈德民　张一军　张　仁　张　平　张有天　张进平　张英会
张性一　张德平　陆宗磐　陆家佑　陈宗梁　陈厚群　陈祖安　陈祖煜
陈惠明　陈　皓　陈锡芳　陈愈炯　苑赫宗　范天佑　范元勋　林可冀
林鸿镁　周志清　周志德　周尚洁　周建平　周桂珠　周维垣　单　鹰
赵深山　赵　琨　赵毓崑　胡以鹏　胡积龄　胡赛华　柳宇强　俞培基
郁绮霞　姜乃森　袁　玖　袁定远　袁建新　聂容亮　顾洪宾　徐国授
徐恭禄　徐肇祉　殷有泉　郭建欣　唐友一　诸维珍　陶振宇　黄天润
黄仁福　黄汉成　黄国兴　黄宣范　曹征齐　曹健人　崔治平　崔诗礼
章景安　梁见诚　屠明德　蒋友谅　蒋国澄　韩　立　傅元初　傅建臣
舒廉甫　逯宪法　谢省宗　蔡鹤鸣　管跃东　潘少川　冀培民　魏志远
濮家骝

水力发电卷（第三版）
主要编辑出版人员名单

责任编辑　华　峰　曹　慧

索引编辑　华　峰　曹　慧

设计负责　王建华　李东梅　李卫东　杨志国

封面设计　王红柳

正文设计　张　娟　肖光艺

责任描图　陈丽梅　马素芳

责任校对　罗凤贤　李　楠

责任印制　邹树群


中国电力出版社
刮开涂层
查询真伪